MEDICINA TROPICAL
**La globalización del chagas**

CAMBIO CLIMÁTICO
**El efecto de las nubes en el calentamiento**

ARQUEOLOGÍA
**La universidad más antigua del mundo**

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA




# LAS 10 IDEAS CIENTÍFICAS MÁS REVOLUCIONARIAS

**¿Qué técnicas emergentes tienen mayor potencial para transformar el mundo?**

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
10 TÉCNICAS EMERGENTES DISRUPTIVAS | LA GLOBALIZACIÓN DEL CHAGAS | NUBES Y CAMBIO CLIMÁTICO
N.º 497
FEBRERO 2018




6,90 EUROS




ANNIE GREEN-ARMYTAGE, ALAMY

## ARTÍCULOS


4


56


86

# INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

## SECCIONES

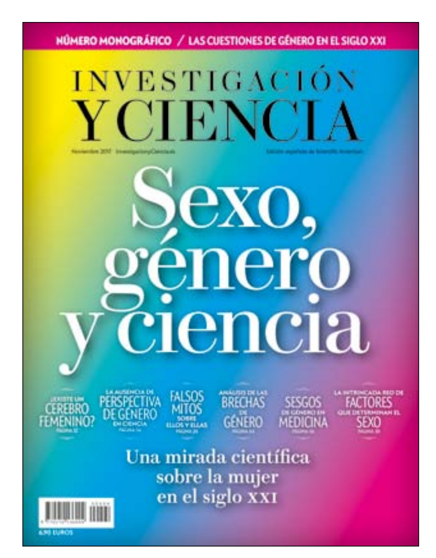


EN PORTADA

¿Qué tecnologías ofrecen hoy un potencial verdaderamente transformador de nuestras sociedades? Un informe elaborado en colaboración con expertos del Foro Económico Mundial y otros especialistas singulariza, entre otros avances, las biopsias líquidas, las vacunas genéticas, la fotosíntesis artificial, la agricultura de precisión, el urbanismo sostenible, ciertas técnicas de inteligencia artificial y la llegada de los primeros ordenadores cuánticos funcionales.



redaccion@investigacionyciencia.es




*Noviembre 2017*

### EDUCACIÓN TEMPRANA

En el artículo «Las brechas de género en el mercado laboral» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2017], J. Ignacio Conde-Ruiz e Ignacio Marra afirman que, para promover la conciliación, «se debería universalizar la educación de 0 a 3 años. Hay pruebas empíricas de que ello no solo facilita la incorporación de la mujer al mercado laboral, sino que también mejora las habilidades cognitivas de los niños y su posterior desarrollo intelectual».

Me ha sorprendido leer que la educación fuera de la familia a una edad tan tempana, incluso desde los 0 años, puede tener efectos positivos a largo plazo en el desarrollo intelectual de los niños. ¿Podrían aclarar los autores a qué pruebas empíricas se refieren?

Ariadna Sierra
*Barcelona*

Responde Conde-Ruiz: *Las pruebas que tenemos son las siguientes. Por un lado, las bajas por maternidad tras el parto son positivas, pues facilitan la lactancia y la inmunización del bebé (*véase *«Maternity leave, early maternal employment and child health and development in the US»; Lawrence M. Berger, Jennifer Hill y Jane Waldfogel en* The Economic Journal*, vol. 115, págs. F29-F47, febrero de 2005; onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0013-0133.2005.00971.x/full). Por otro, existen numerosas pruebas empíricas sobre la importancia que tienen los primeros años de vida en las facultades cognitivas y no cognitivas (rasgos de personalidad, emocionales y sociales) en la edad adulta (por ejemplo, «Estimating the technology of cognitive and noncognitive skill formation»; Flavio Cunha, James J. Heckman y Susanne M. Schen en* Econométrica*, vol. 78, págs. 883-931, mayo de 2010; onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3982/ECTA6551/full).*

*En el artículo defendíamos introducir la educación pública entre 0 y 3 años como una medida que no solo tiene efectos positivos sobre la participación laboral de las madres, sino que además mejorará las facultades futuras de los niños. No obstante, es cierto que tendríamos que haber enfatizado que dicha educación debería iniciarse después de la baja de maternidad.*

### NIÑOS TRANSGÉNERO

En «Niños transgénero», Kristina Olson habla sobre niños que eligen cambiar de género. Entre los 6 y los 16 años, yo quería ser un chico. Jugaba casi exclusivamente con ellos, odiaba las cosas «de chicas» y las otras niñas me parecían bastante tontas. Hoy, mi forma de pensar está mucho más alineada con el mundo masculino, pero soy definitivamente una mujer, felizmente casada con un hombre. Es imposible que un niño tenga la madurez suficiente para tomar la drástica decisión de iniciar un tratamiento médico de cambio de sexo.

Elsa Huntley
*Vancouver*

Responde Olson: *Es una observación útil. Como se menciona en el artículo, muchos niños que desafían los estereotipos de género no son transexuales. El artículo y mi trabajo se centran en las transiciones sociales tempranas, las cuales implican medidas como cambiar de nombre, no un tratamiento médico. Como investigadora ajena a la clínica, no defiendo ni condeno tales intervenciones. Mi esperanza es que mi trabajo resulte útil para determinar qué niños crecerán con una identidad cis- o transgénero hasta la vida adulta, y clarificar qué tipo de tratamientos maximizarán su bienestar.*

### DESARROLLO INTERSEXUAL

En «Más allá de XX y XY», Amanda Montañez da visibilidad a la intersexualidad mostrando que las variaciones con respecto a las nociones tradicionales de masculino y femenino son numerosas y naturales. Solo hay un aspecto de la intersexualidad que hubiéramos preferido no ver: la necesidad de «repararla». El diagrama señala la posibilidad de alterar quirúrgicamente los genitales o extirpar las gónadas de niños con ciertos diagnósticos, pero no menciona las consecuencias. Una genitoplastia «feminizante» puede saldarse con cicatrices, dolor crónico y pérdida permanente de la sensación sexual; las gonadectomías causan esterilización.

Criar a alguien como niño o como niña no requiere cirugía. La identidad de género de los menores puede no concordar con aquella en la que son criados, por lo que esta nunca debería imponerse de manera irreversible.

Kimberly Zieselman
*Directora de interACT, organización de defensa de los derechos de las personas intersexuales*

Responde Montañez: *La infografía se limita a presentar los aspectos científicos del sexo y el género en cuanto espectro, sin entrar en los posibles impactos sobre la salud. La cirugía se incluía como una opción para moverse a través de dicho espectro porque muchos recurren a ella. Hasta qué punto puede solaparse la intersexualidad con las identidades transgénero o no binarias es una cuestión diferente y muy compleja, de la que el gráfico solo puede dar una imagen incompleta.*

## Erratum corrige

El artículo **Arañas de trampilla de las islas Baleares** [por Elisa Mora y Miquel Arnedo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2017] se refería a las arañas como «insectos», en lugar de «artrópodos». Agradecemos a Mario (@L_ssar) por haberlo advertido a través de Twitter.

*Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EL MEDITERRÁNEO DE NOCHE: Según datos de satélite, la superficie del mundo iluminada artificialmente ha crecido en al menos un 2,2 por ciento al año entre 2012 y 2016.

CORTESÍA DEL OBSERVATORIO DE LA TIERRA DE LA NASA; IMÁGENES DE JOSHUA STEVENS A PARTIR DE LOS DATOS DE VIIRS (INSTRUMENTO A BORDO DEL SATÉLITE SUOMI NPP) RECOPILADOS POR MIGUEL ROMÁN Y EL CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA

CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

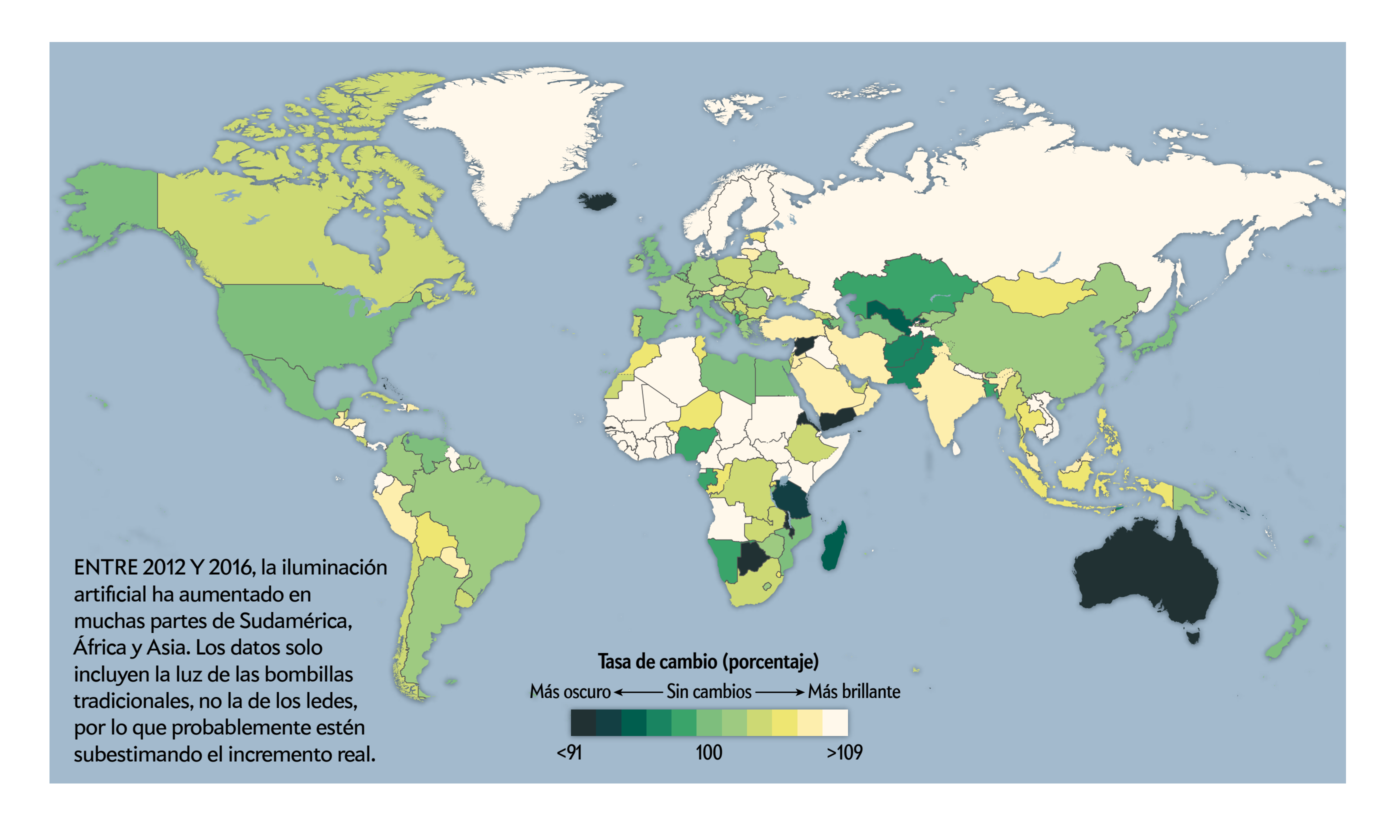
# El fin de la noche

## Un nuevo estudio alerta del aumento de iluminación artificial en una parte cada vez mayor del planeta

**La luz artificial** suele verse como símbolo de progreso. Sin embargo, hace tiempo que los científicos advierten de que las noches excesivamente iluminadas perjudican no solo a los astrónomos, sino también a los animales e incluso a nuestra salud.

Ahora, un nuevo trabajo ha demostrado que las noches del planeta se están tornando aún más brillantes. Según un estudio publicado el pasado mes de noviembre en *Science Advances*, entre 2012 y 2016 la superficie de la Tierra iluminada artificialmente creció a un ritmo del 2,2 por ciento anual (*mapa*). Sin embargo, es probable que dicha cifra esté subestimando el problema, ya que las mediciones no incluían la mayor parte de las lámparas de ledes de bajo consumo que, en todo el mundo, están reemplazando a las de vapor de sodio, explica Christopher Kyba, investigador posdoctoral del Centro Alemán de Investigación de Geociencias de Potsdam y primer firmante del artículo.

Los nuevos datos proceden del Radiómetro para la Toma de Imágenes en el Visible y el Infrarrojo (VIIRS), un instrumento a bordo de un satélite de la NASA diseñado para detectar las longitudes de onda más largas del espectro visible, como las emitidas por las tradicionales farolas amarillas y anaranjadas de vapor de sodio. Sin embargo, el aparato no es capaz de registrar la componente azul de los ledes blancos, correspondiente a una longitud de onda menor. Se ha




ENTRE 2012 Y 2016, la iluminación artificial ha aumentado en muchas partes de Sudamérica, África y Asia. Los datos solo incluyen la luz de las bombillas tradicionales, no la de los ledes, por lo que probablemente estén subestimando el incremento real.

demostrado que esta luz altera el ciclo de sueño de las personas y el comportamiento de los animales nocturnos.

Los investigadores creen que es la actual transición a los ledes lo que ha provocado que aquellos países que ya mostraban niveles elevados de iluminación, como Italia, Países Bajos, España y EE.UU., hayan permanecido estables en los datos del VIIRS. En cambio, la mayoría de las naciones de Sudamérica, África y Asia revelaron niveles crecientes, lo que indicaría un aumento en el uso de la iluminación tradicional. Sorprendentemente, Australia parece haber perdido área iluminada, si bien los investigadores creen que ello podría deberse a una distorsión de los datos causada por los incendios forestales.

«Es muy triste que el VIIRS haya detectado un aumento [en muchos países] a pesar de no poder ver en la parte del espectro que más ha crecido», comenta Fabio Falchi, investigador del Instituto de Ciencia y Tecnología de la Contaminación Lumínica de Italia que no participó en el estudio. En 2016, junto con Kyba y otros miembros de su equipo, Falchi publicó un atlas global que puso de manifiesto que, hoy en día, un tercio de la población mundial vive bajo cielos demasiado brillantes para ver la Vía Láctea de noche.

Los datos también cuestionan la idea de que la revolución de los ledes traería consigo una reducción del gasto energético. Entre 2012 y 2016, el PIB de la nación mediana se incrementó en un 13 por ciento, mientras que sus emisiones en longitud de onda larga lo hicieron en 15 puntos porcentuales. Y, en general, se observó una correlación entre la producción total de luz de cada país y su PIB. En palabras de Kyba: «Compraremos tanta luz como dinero estemos dispuestos a gastar en ella».

*—Joshua Sokol*



LÉMUR SALTADOR COLIRROJO

ETOLOGÍA

# Recolectores de frutos en apuros

## La peculiar alimentación de los lémures explicaría en parte su singular biología

**Los lémures** son primates como el ser humano, pero ahí acaba el parecido. Endémicos de Madagascar, la extensa isla situada ante la costa oriental de África, entre sus filas figuran algunos de los únicos miembros del orden que hibernan o que se alimentan predominantemente de hojas y no de frutos. Esa predilección por el follaje podría parecer trivial, si no fuera porque las aves y los murciélagos malgaches consumen también menos frutos que sus homónimos de Asia, África y América. A la vista de que el hábito es compartido por tantos otros animales, el primatólogo Giuseppe Donati, de la Universidad Oxford Brookes, sospecha que los frutos de la isla podrían ocultar alguna peculiaridad.

Junto con otros nutrientes, los frutos suministran las proteínas necesarias para multitud de procesos corporales, desde la formación del tejido muscular hasta el transporte del oxígeno por el torrente sanguíneo. Al medir la cantidad de nitró-

FUENTE: «ARTIFICIALLY LIT SURFACE OF EARTH AT NIGHT INCREASING IN RADIANCE AND EXTENT», CHRISTOPHER C. M. KYBA ET AL., *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 3, N.º 11, ART. E1701528, 22 DE NOVIEMBRE DE 2017; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*); STUART WESTMORLAND, GETTY IMAGES (*lémur*)

«Aún es un enigma por qué tantos rasgos de la biología de los lémures son tan peculiares, y la alimentación tiene mucho que decir al respecto.»

—CALEY JOHNSON, ANTROPÓLOGA

geno contenida en los frutos de 62 regiones tropicales de todo el planeta, Donati y su equipo calcularon la cantidad de proteínas que aportan.

Descubrieron así que los del continente americano, Asia y gran parte de África contienen niveles similares de dicho elemento, mientras que los de Madagascar presentan una cuarta o una tercera parte menos. Aun así, los lémures se las ingenian para tomar la misma cantidad que los demás primates, lo cual sugiere que estos singulares animales han hallado el modo de adaptarse a esa fruta de menos calidad. «En Madagascar, los frutos no bastan para satisfacer las necesidades de nitrógeno [de los lémures]», asegura Donati. Además, los árboles de la isla fructifican en momentos impredecibles debido a la gran frecuencia de los ciclones y la escasa fertilidad del suelo, por lo que los lémures podrían haber adoptado esa dieta folívora para compensar. Donati y sus colaboradores publicaron sus resultados el pasado octubre en *Scientific Reports*.

«Aún es un enigma por qué tantos rasgos de la biología de los lémures son tan peculiares, y la alimentación tiene mucho que decir al respecto», opina Caley Johnson, antropóloga de la Universidad Estatal de Arizona, ajena al estudio. Además, los resultados podrían aclarar por qué las pocas especies de lémures que son frugívoras han adoptado hábitos catemerales: son activas día y noche, tal vez porque precisen dedicar más tiempo a la alimentación. La escasez de sustento hasta podría explicar el motivo por el que algunas hibernan: es mejor dormir durante el invierno que correr el riesgo de morir de inanición.

Como uno de los grupos de primates más amenazados del planeta, los lémures afrontan un trance vital. Si queremos que los esfuerzos de conservación culminen con éxito, será forzoso conservar los bosques que constituyen su despensa.

—*Jason G. Goldman*

CHRIS SAULIT, GETTY IMAGES



**EL CRÁTER DE IMPACTO** de Barringer, en Arizona.

MATERIALES

# Diamante en bruto

## Un «vídeo» de rayos X revela el proceso de formación de una variedad poco frecuente de diamante

**Cuando un meteorito** que contiene grafito se estrella contra la Tierra, el calor y la presión generados en la colisión pueden transformar esta forma de carbono en un tipo de diamante raro y extremadamente duro. Hace tiempo que los científicos debaten sobre cómo se desarrolla el proceso a nivel atómico. Ahora, se hallan en condiciones de responder algunas preguntas tras haber simulado el impacto y ver en tiempo real cómo se produce la transformación.

En una sala especializada del Laboratorio Nacional Argonne —la primera de su tipo—, el físico de la Universidad Estatal de Washington Yogendra Gupta y sus colaboradores remedaron el impacto de un meteorito disparando una bala de fluoruro de litio contra un disco de grafito a 5,1 kilómetros por segundo. Los investigadores usaron rayos X muy brillantes para «fotografiar» el evento a una velocidad de 150.000 millones de fotogramas por segundo.

«En el contexto de los meteoritos, uno siempre se pregunta si esta transición del grafito al diamante ocurre durante la compresión, o bien como combinación de una deformación y [liberación de tensión] después del choque», comenta Gupta. «Hemos demostrado claramente que sucede durante la compresión.» En concreto, este raro «diamante hexagonal», así llamado por su estructura cristalina, se forma a una presión de 500.000 atmósferas y en una escala de tiempo de milmillonésimas de segundo. El hallazgo apunta a que el impacto necesario para que se genere un diamante de este tipo podría no ser tan violento como se pensaba.

Algunas investigaciones previas indicaban que el diamante hexagonal solo se creaba a presiones casi cuatro veces mayores. Otros estudios habían hallado que el grafito comenzaba a transformarse a presiones más bajas, pero las mediciones con rayos X de esos experimentos revelaban una mezcla de distintos tipos de diamante, por lo que «nadie sabía exactamente cómo ocurría la transición», explica Gupta. La mayoría de las investigaciones anteriores habían examinado las transformaciones atómicas producidas al aplicar una compresión gradual. Por el contrario, los nuevos experimentos muestran la formación de diamantes hexagonales directamente a partir del grafito durante un choque repentino, perfectamente alineados con la dirección del impacto. Los resultados fueron presentados el pasado mes de octubre en *Science Advances*.

«Lo más emocionante de este trabajo es la manera en que los investigadores determinaron las posiciones precisas de los átomos mientras se pasaba de una estructura cristalina a la otra», explica Lorin Benedict, físico del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore que no participó en el trabajo.

Una vez que disminuyó la presión, el diamante conservó su forma. Ahora, Gupta desea averiguar si se mantendrá estable cuando la tensión se reduzca a cero. Tales experimentos podrían dar lugar a una nueva forma de producir diamantes para uso industrial.

—*Rachel Berkowitz*

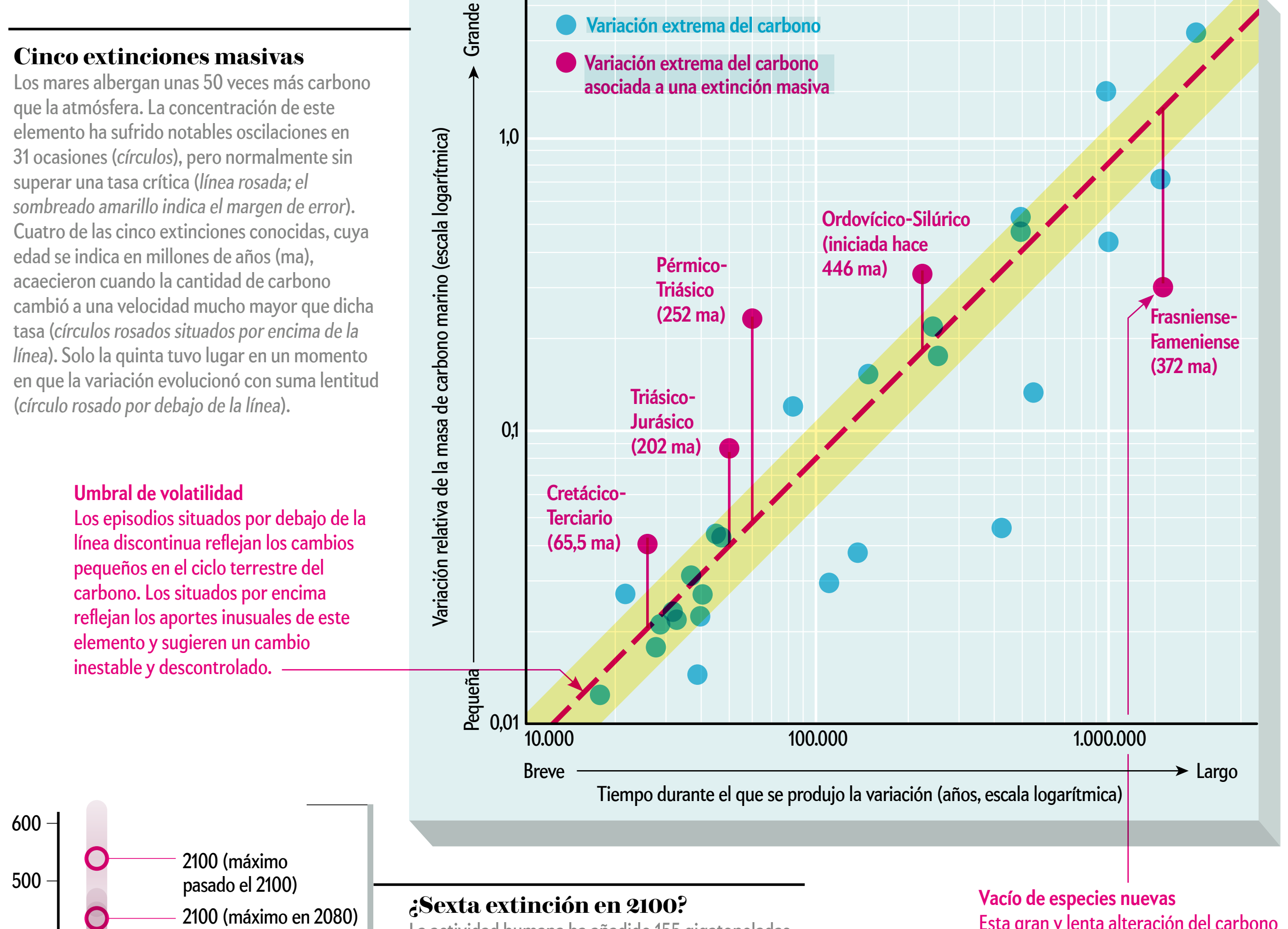
SOSTENIBILIDAD

# Mares mortíferos

## En 2100 podría dar comienzo una extinción masiva por el exceso de carbono en los océanos

**El carbono acumulado** en los mares del planeta ha variado lentamente a lo largo de los eones. Pero en 31 ocasiones durante los últimos 542 millones de años la concentración de este elemento se ha desviado mucho más de lo normal o mucho más rápido de lo habitual (*círculos de la gráfica principal*). Las cinco extinciones masivas han tenido lugar a la par que los episodios más extremos de acumulación de carbono (*círculos rosados*). En cada una de ellas, más del 75 por ciento de la fauna marina desapareció. La Tierra pronto podría alcanzar un nuevo punto crítico similar. En 1850, los mares albergaban unas 38.000 gigatoneladas de carbono, pero un estudio reciente del catedrático de geofísica Daniel H. Rothman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, indica que si se añadieran 310 gigatoneladas o más, la desviación volvería a ser aguda. En el siglo y medio transcurrido, la humanidad ya ha aportado unas 155 gigatoneladas, por lo que, de seguir así, vamos en camino de alcanzar las 400 gigatoneladas en 2100 (*gráfica pequeña*). ¿Aumenta eso el riesgo de una extinción masiva? «Sí, mucho», sentencia Rothman.

—*Mark Fischetti*




### Cinco extinciones masivas

Los mares albergan unas 50 veces más carbono que la atmósfera. La concentración de este elemento ha sufrido notables oscilaciones en 31 ocasiones (*círculos*), pero normalmente sin superar una tasa crítica (*línea rosada; el sombreado amarillo indica el margen de error*). Cuatro de las cinco extinciones conocidas, cuya edad se indica en millones de años (ma), acaecieron cuando la cantidad de carbono cambió a una velocidad mucho mayor que dicha tasa (*círculos rosados situados por encima de la línea*). Solo la quinta tuvo lugar en un momento en que la variación evolucionó con suma lentitud (*círculo rosado por debajo de la línea*).

**Umbral de volatilidad**
Los episodios situados por debajo de la línea discontinua reflejan los cambios pequeños en el ciclo terrestre del carbono. Los situados por encima reflejan los aportes inusuales de este elemento y sugieren un cambio inestable y descontrolado.

**Vacío de especies nuevas**
Esta gran y lenta alteración del carbono marino parece haber ido acompañada de una extraña anomalía: durante más de un millón de años aparecieron muy pocas especies nuevas. Como otras desaparecieron durante ese lapso de tiempo, la diversidad total mermó notablemente.

### ¿Sexta extinción en 2100?

La actividad humana ha añadido 155 gigatoneladas de carbono a los mares desde mediados del siglo XIX, un ritmo tan acelerado que podría causar un cambio catastrófico si se supera un valor límite. Si el aporte antrópico alcanzase las 310 gigatoneladas, el mundo podría traspasar el umbral crítico capaz de desatar una sexta extinción masiva. Un solo escenario, reducir las emisiones mundiales a partir de 2020, evitaría a duras penas ese umbral. Otras situaciones hipotéticas, como alcanzar los máximos de emisión y no iniciar la reducción hasta 2040, 2080 o pasado 2100, agravarían notablemente el riesgo de extinción.

FUENTE: «THRESHOLDS OF CATASTROPHE IN THE EARTH SYSTEM», DANIEL H. ROTHMAN, EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 3, N.º 9, ART. E1700906, 20 DE SEPTIEMBRE DE 2017; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

BIOFÍSICA

# El fabuloso oído de la marsopa

## Los cetáceos poseen su propio sonar natural

**El sonar militar** más avanzado empequeñece al lado de la ecolocalización que las marsopas despliegan para detectar a las presas, los depredadores y los obstáculos. Al emitir chasquidos a través de su espiráculo (orificio respiratorio), los cetáceos pueden percibir objetos de unos pocos centímetros de tamaño situados a cien metros de distancia, lo que equivaldría a que nosotros distinguiéramos una nuez desde el extremo opuesto de un campo de fútbol. Los buques equipados con sonar, en cambio, han de emitir las ondas acústicas desde distintas fuentes separadas por varios metros de distancia. Un estudio sugiere ahora que la prodigiosa capacidad de ecolocalización de las marsopas se debe a la existencia de ciertas estructuras en su cabeza que son ajustables, un descubrimiento que podría contribuir a refinar el sonar humano.

Este opera emitiendo ondas acústicas sobre los objetos y midiendo el tiempo de retorno del eco. Normalmente, si la fuente generadora de los impulsos sónicos es más pequeña que la longitud de onda del sonido, emite las señales acústicas en todas direcciones, como la luz dispersada por las esferas de discoteca. Si se quiere enviar un haz focalizado en una dirección concreta, la fuente ha de ser forzosamente mucho mayor que la longitud de onda. Sin embargo, la marsopa logra eludir ese requisito.

Para desvelar su secreto se ha examinado la cabeza de la marsopa sin aleta (*Neophocaena phocaenoides*) mediante tomografía axial computarizada (TAC). Se ha averiguado así que posee una anatomía compleja, constituida por sacos aéreos, el melón y otras partes blandas, además de los propios huesos del cráneo. Todos estos componentes conforman capas que son atravesadas por el sonido con distintas velocidades, lo que permite al animal controlar la amplitud de los haces. «Si logramos desentrañar los entresijos de esas estructuras, podremos rediseñar los sistemas de sonar e instalarlos en embarcaciones [más pequeñas]», afirma Wenwu Cao, físico de la Universidad Estatal de Pensilvania y coautor del estudio, publicado el pasado diciembre en *Physical Review Applied*.

El trabajo indica que las marsopas comparten la emisión de chasquidos con otro mamífero conocido por sus dotes de ecolocalización: el murciélago. «Me intriga la posibilidad de que las marsopas puedan modificar su patrón de emisión comprimiendo los componentes del melón», afirma Rolf Müller, catedrático de ingeniería mecánica del Instituto Politécnico de Virginia, que ha estudiado el sonar de los quirópteros pero no ha participado en el estudio de las marsopas. Todo apunta a que murciélagos y cetáceos nos llevan bastante ventaja en este campo.

—*Clara Moskowitz*



MARSOPA SIN ALETA

GETTY IMAGES (*marsopa*); MARÍA DEL ÁLAMO ORTEGA/11DEFEBRERO.ORG (*cartel agenda*)

AGENDA

### CONFERENCIAS

*14 de febrero*
**¿Un veneno legal? La pintura con plomo, en juego entre la salud ocupacional y la ambiental. Siglos XIX y XX**
Judith Rainhorn, Universidad de París-1
Del ciclo «Metales pesados tóxicos en el trabajo y en el ambiente»
Instituto de Historia de la Medicina y la Ciencia López Piñero, Valencia
www.uv.es

*26 de febrero*
**La banalización de la ciencia: El proyecto Manhattan**
Xavier Roqué, Universidad Autónoma de Barcelona
Del ciclo «Feynman y la evolución de la ciencia en el siglo XX»
Biblioteca Sagrada Familia
Barcelona
ajuntament.barcelona.cat

### EXPOSICIONES

*Hasta el 7 de febrero*
**Los números y la humanidad**
Edificio Histórico de la Universidad de Barcelona
Barcelona
gisme.eu/exponumhum/es/index.php

### OTROS

*Del 1 al 15 de febrero — Jornadas*
**Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia**
Numerosas actividades en todo el territorio nacional
11defebrero.org




*7 y 21 de febrero — Talleres*
**Matemáticas en acción**
Música digital (7/2)
y ciencia de datos (21/2)
Para alumnos universitarios y profesores de secundaria
Universidad de Cantabria
Santander
web.unican.es

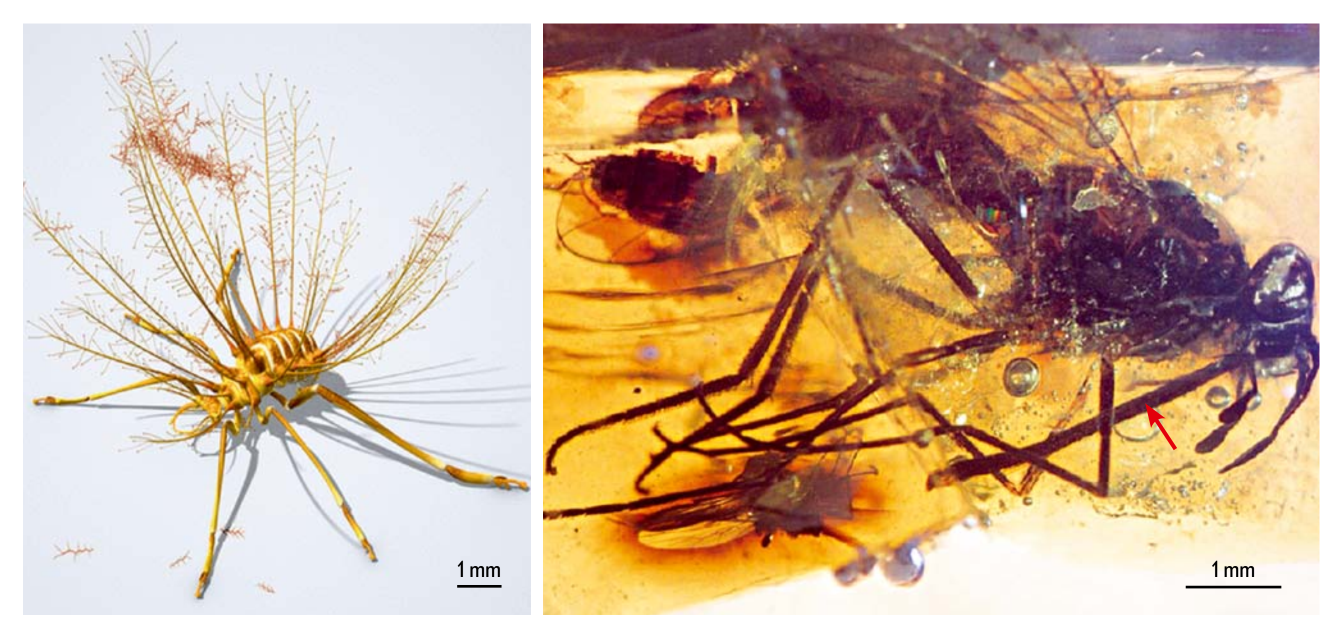
*Hasta el 28 de febrero — Congreso (plazo de inscripciones)*
**Ciencia e ideología**
III Congreso de Pensamiento Crítico y Divulgación Científica (6-7/3)
Universidad de Valencia
esdeveniments.uv.es

PALEONTOLOGÍA

# Historias de mutualismo fosilizadas

## El ámbar cretácico de España revela primitivas asociaciones entre plantas e insectos

*DAVID PERIS Y XAVIER DELCLÒS*




EN EL ÁMBAR DE EL SOPLAO, en Cantabria, se han descubierto insectos que ya exhibían algunas de las conductas observadas hoy. La larva *Hallucinochrysa diogenesi* acumulaba tricomas de helecho para evitar a los depredadores (*izquierda, reconstrucción*). Las moscas zhangsólvidas, como esta incluida en ámbar (*derecha*), mostraban una larga probóscide (*flecha*) con la que chupaban el néctar y polinizaban las plantas.

Hace 105 millones de años, Iberia era una isla con un paisaje y una fauna muy diferentes a los actuales. Había dinosaurios y los bosques empezaban a cambiar de aspecto, a adquirir color. Existían grandes extensiones dominadas por bosques de coníferas y otras gimnospermas (grupo de plantas sin flores, con el fruto desnudo), como ginkgos, cicadales y bennettitales. Conviviendo con ellas se mezclaban de forma puntual las angiospermas (plantas con flores), que pocos millones de años más tarde acabarían dominando la vegetación terrestre hasta nuestros días. En tales bosques había árboles que rezumaban resina que, con el tiempo, se transformaría en el ámbar que hoy encontramos. Este corresponde a resina fosilizada que fue liberada en el pasado por diferentes familias de coníferas, algunas de las cuales se extinguieron.

Cuando la planta produce resina, esta permanece pegajosa durante cierto tiempo, entre unos pocos días y algunas semanas. En ese período, una gran variedad de pequeños organismos pueden quedar atrapados y, más tarde, si se dan las condiciones necesarias de fosilización, se conservan durante miles o millones de años. El ámbar es el mejor conservador de fósiles que se conoce en el registro geológico. No solo preserva la estructura tridimensional del ser vivo, sino también los órganos más frágiles, como los ojos y las antenas, y, en ocasiones, los tejidos, como la musculatura.

Los restos de organismos incluidos en ámbar más antiguos corresponden al Triásico, hace unos 230 millones de años, y se descubrieron en Italia. Sin embargo, no es hasta el Cretácico cuando se hallan yacimientos de ámbar con abundantes bioinclusiones (restos de organismos). Después de los del Líbano (de unos 130 millones de años), figuran numerosos yacimientos en España, datados en unos 105 millones de años, seguidos por los de otras partes del mundo, pertenecientes a épocas geológicas posteriores.

Las investigaciones realizadas por nuestro grupo, denominado AMBARES (acrónimo de ámbares de España), en dos de los yacimientos de ámbar más importantes de España ayudan a comprender los ecosistemas terrestres del pasado y a conocer cuándo y cómo se originaron algunas de las relaciones ecológicas más relevantes de nuestros días. Destacamos dos de esas conductas: el camuflaje y la polinización entomófila (realizada por insectos).

### Camuflaje ancestral

En 2012, describimos la nueva especie *Hallucinochrysa diogenesi,* o crisopa alucinante de Diógenes, una larva de unos cuatro milímetros de longitud del grupo de los neurópteros, entre los que se encuentran las actuales crisopas verdes. La larva se hallaba fosilizada en ámbar del Cretácico de El Soplao, en Cantabria, de unos 105 millones de años de antigüedad, y fue estudiada por su peculiar «disfraz», formado por residuos vegetales que iba recogiendo del entorno. La denominación de la especie hace precisamente alusión a la sorprendente semejanza de su conducta con el síndrome de Diógenes, una patología que afecta a algunas personas que acumulan basura de manera compulsiva.

El camuflaje no es una característica única de los camaleones o de las maripo-

JOSÉ ANTONIO PEÑAS, MODIFICADO POR ENRIQUE PEÑALVER (*Hallucinochrysa diogenesi*); ENRIQUE PEÑALVER (*Mosca zhangsólvida y ámbar de El Soplao*)

EN EL ÁMBAR de El Soplao, en Cantabria, del Cretácico inferior (hace 105 millones de años), se han descubierto indicios de relaciones primigenias de mutualismo entre insectos y plantas.



sas oscuras que viven sobre las cortezas de los árboles, sino que esta eficaz estrategia, utilizada tanto para cazar como para defenderse de los depredadores, se observa en numerosos linajes del mundo animal. En su deambular por los ecosistemas cretácicos, esta larva recogía tricomas de helecho y los iba entrelazando sobre su cuerpo hasta conseguir ocultarse. Gracias a que quedó cubierta por resina, así como a su particular vestimenta de origen vegetal, sabemos hoy de la existencia de este complejo comportamiento ya en insectos de más de cien millones de años de antigüedad.

Del estudio del fósil se dedujo otro dato excepcional: la existencia de una estrecha relación ancestral entre una planta y un insecto. Posiblemente represente un ejemplo de mutualismo, ya que la larva depredadora libraba de plagas al helecho, mientras que este constituía su hábitat y le aportaba la basura protectora, con lo que ambos organismos habrían obtenido un beneficio mutuo.

## Los orígenes de la polinización

Otro ejemplo de mutualismo ancestral observado en el ámbar es la polinización entomófila. El declive de las gimnospermas y la consiguiente dominancia de las angiospermas, con un ciclo de vida más corto y un crecimiento más rápido, sucedió hace entre 130 y 90 millones de años, justo el tiempo del que datan estos yacimientos. ¿Cómo lograron las plantas con flor conquistar la Tierra? Una de las hipótesis señala que gran parte de su éxito evolutivo se debe a la ayuda que recibieron de los insectos polinizadores (casi todas las plantas con flor actuales son polinizadas por insectos).

La polinización es la relación de mutualismo más exitosa en la naturaleza. Pero ¿se desarrolló esta asociación entre plantas e insectos paralelamente al origen de las flores? A pesar de que aún no ha sido descubierto ningún insecto fósil de esa época con polen de angiosperma adherido a su cuerpo, el ámbar de España ha aportado los tres únicos ejemplos de insectos polinizadores en ese tiempo.

Se trata de ejemplares de tres órdenes de insectos que muestran tres modelos de polinización: una mosca zhangsólvida hallada en el ámbar de El Soplao con una probóscide chupadora (como la de las moscas), posiblemente de néctar; un trips en el ámbar del yacimiento de Peñacerrada I o Moraza (Burgos), con aparato bucal picador para perforar granos de polen o esporas, y un escarabajo oedemérido, también en el ámbar del mismo yacimiento, con aparato bucal masticador.

Pero el dato que más llama la atención es, sin lugar a dudas, que los granos de polen adheridos a sus cuerpos corresponden a diferentes grupos de gimnospermas, no a angiospermas, a pesar de que estas últimas ya formaban parte de los ecosistemas. Tal escenario demuestra que los insectos polinizaban plantas antes incluso de la aparición de las flores, lo que contradice una hipótesis ampliamente aceptada de que la polinización entomófila se iniciaría con la aparición de las angiospermas. Proponemos, entonces, que estas interacciones debieron de actuar como un preludio evolutivo y ecológico a las interacciones posteriores entre las primeras angiospermas y los grupos de insectos polinizadores que ya existían en el Cretácico.

Los fósiles, en general, y las inclusiones en ámbar, en particular, contribuyen notablemente al conocimiento de la evolución de los artrópodos. Pero, además, la exquisita conservación que ofrece el ámbar permite el estudio no solo de la especie fósil que vivió en un ecosistema pretérito, sino también de aspectos de su comportamiento y su relación con otros individuos del ecosistema. Aquí se da una breve pincelada de algunos de los avances más notables que ha propiciado en los últimos años el estudio del ámbar cretácico de España. Sin embargo, la tecnología cada vez más compleja y los nuevos ejemplares que van encontrándose abren nuevas oportunidades para seguir descubriendo, día a día, las singulares historias que estas pequeñas ventanas temporales quieren contarnos.

***David Peris*** *es investigador del Dpto. de Ciencias Agrarias y del Medio Natural de la Universidad Jaime I, en Castellón de la Plana.*

***Xavier Delclòs*** *es profesor del Dpto. de Dinámica de la Tierra y el Océano, de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Barcelona.*

PARA SABER MÁS

**Early evolution and ecology of camouflage in insects.** R. Pérez de la Fuente et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 119, págs. 21.414-21.419, 2012.
**Long-proboscid flies as pollinators of Cretaceous gymnosperms.** E. Peñalver et al. en *Current Biology*, vol. 25, n.º 14, págs. 1917–1923, 2015.
**False blister beetles and the expansion of gymnosperm-insect pollination modes before angiosperm dominance.** D. Peris et al. en *Current Biology*, vol. 27, págs. 897-904, 2017.
Proyecto AMBERIA: **www.igme.es/amberia/**

EN NUESTRO ARCHIVO

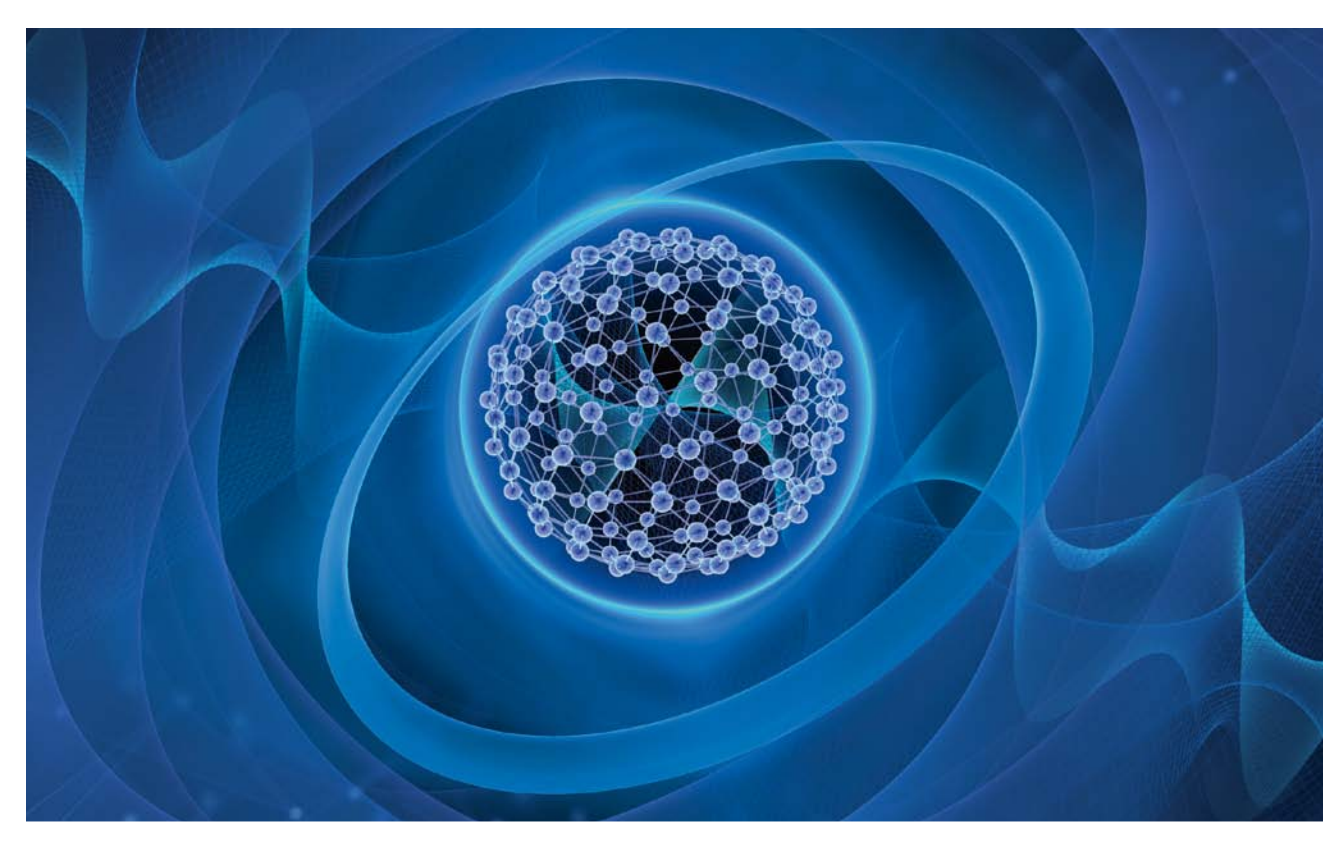
**Atrapados en ámbar.** David A. Grimaldi en *IyC*, junio de 1996.
**Crustáceos acuáticos en ámbar de Chiapas.** M. Lourdes Serrano, Elena Centeno y Francisco J. Vega en *IyC*, junio de 2017.

FÍSICA ATÓMICA

# Rompecabezas hiperfino

Nuevos experimentos con átomos de bismuto muy ionizados revelan una chocante discrepancia con respecto a las predicciones de la electrodinámica cuántica

*JEAN-PHILIPPE KARR*



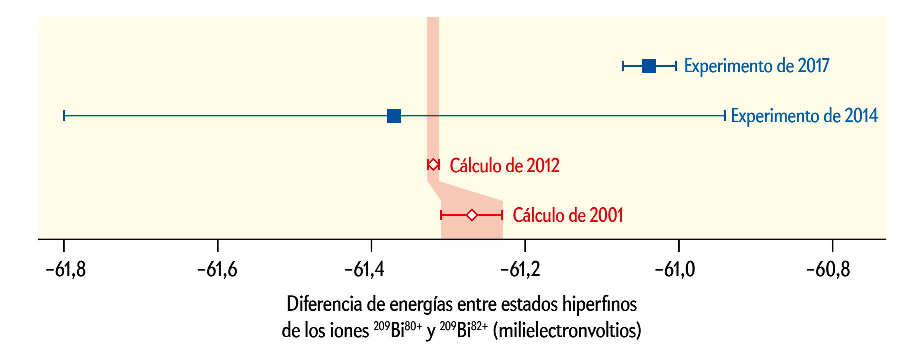
**RECREACIÓN ARTÍSTICA DE UN NÚCLEO PESADO** con un solo electrón orbitando a su alrededor. En estos casos y otros similares, los pequeños cambios en los niveles de energía electrónicos inducidos por el intenso campo magnético del núcleo permiten poner a prueba la teoría cuántica que describe la interacción electromagnética.



Con una respetable edad que ya ronda los setenta años, la electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés), la teoría cuántica de campos que describe la interacción electromagnética, es una de las teorías físicas más y mejor verificadas de la historia. Así las cosas, tal vez sorprenda saber que aún es posible ponerla a prueba de una manera cualitativamente nueva. Eso es justamente lo que han logrado Johannes Ullmann, de la Universidad Técnica de Darmstadt, y sus colaboradores. Los resultados, publicados en *Nature Communications*, muestran un sorprendente desacuerdo con respecto a las predicciones de la QED.

Ullmann y su equipo han efectuado mediciones extraordinariamente precisas del desdoblamiento hiperfino del estado fundamental de átomos de bismuto muy ionizados. En general, el desdoblamiento hiperfino de los niveles de energía de un átomo hace referencia a los minúsculos cambios que tienen lugar en su espectro cuando se toma en consideración la interacción de los electrones con el campo magnético del núcleo. En átomos de gran masa, dicho campo es en torno a un millón de veces mayor que el generado por núcleos ligeros, lo que permite poner a prueba la QED en presencia de los campos más intensos que pueden alcanzarse. En sus experimentos con átomos de bismuto, Ullman y sus colaboradores comprobaron que los resultados diferían de las predicciones teóricas en unas siete desviaciones estándar (sigmas).

Hasta hoy contábamos con dos ejemplos de discrepancias inexplicables entre los experimentos y las predicciones de la QED. Uno concierne al momento magnético anómalo del muon, una cantidad de gran interés por cuanto la elevada masa de esta partícula (207 veces mayor que la del electrón) hace que dicho efecto sea mucho más sensible que su equivalente electrónico a hipotéticas interacciones más allá del modelo estándar. El segundo se debe al valor del radio del protón según se deduce de las mediciones espectroscópicas del hidrógeno muónico (un núcleo de hidrógeno en torno al cual orbita un muon, en lugar de un electrón); desde hace un tiempo, se sabe que esta cantidad difiere en más de siete desviaciones estándar de la obtenida en experimentos de dispersión y en espectroscopía de átomos normales. En los últimos años, ambos problemas han desencadenado una intensa actividad teórica y experimental. Actualmente




**TEORÍA FRENTE A EXPERIMENTO:** Predicciones teóricas (*rojo*) y resultados experimentales (*azul*) para cierta diferencia ponderada entre desplazamientos hiperfinos en iones de bismuto con tres electrones y con uno solo, respectivamente. La desviación entre el último resultado experimental (2017) y la mejor predicción teórica (2012) ronda las siete desviaciones estándar.

DE «HIGH PRECISION HYPERFINE MEASUREMENTS IN BISMUTH CHALLENGE BOUND-STATE STRONG-FIELD QED», JOHANNES ULLMANN ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 8, ART. 15484, MAYO DE 2017.

ya hay planeada una nueva medición del momento magnético del muon, al tiempo que varios experimentos de dispersión y espectroscopía láser investigan el rompecabezas del radio del protón.

### Efectos nucleares

El trabajo de Ullmann y su equipo ha explorado un sector distinto de la QED. En su estudio, los electrones experimentan un campo nuclear muy intenso, lo que actúa como una «lupa» sobre los efectos relativistas y cuánticos. En iones con un solo electrón, las transiciones atómicas de interés suelen encontrarse en el dominio de los rayos X, lo que dificulta un estudio espectroscópico preciso. Sin embargo, los efectos de la QED son tan acusados que la moderada precisión que proporcionan los espectrómetros de cristal ha bastado para poner a prueba la teoría. Algunos ejemplos notables los hallamos en las mediciones del efecto Lamb en átomos de uranio con un electrón ($U^{91+}$) y con tres ($U^{89+}$). Por otra parte, pueden encontrarse transiciones finas o incluso hiperfinas en el óptico, lo que, junto con otras propiedades, abre una atractiva ventana a la espectroscopía láser. Esta fue explotada por primera vez hace más de veinte años para medir el desdoblamiento hiperfino del estado fundamental en iones de bismuto con un solo electrón ($Bi^{82+}$).

Sin embargo, en iones con una gran carga eléctrica neta, los electrones tienden a situarse mucho más cerca del centro del átomo, lo que aumenta la magnitud de algunos fenómenos nucleares. En el caso del desdoblamiento hiperfino, estos se manifiestan a través del efecto Bohr-Weisskopf, el cual se debe a la manera en que se distribuye la magnetización a lo largo del núcleo. La incertidumbre relacionada con este fenómeno enmascara en gran parte la contribución de la QED e impide identificarla a partir de las mediciones del desdoblamiento hiperfino. Con todo, hay una manera de sortear esta limitación: al combinar las medidas en iones con un electrón ($^{209}Bi^{82+}$) y en aquellos con tres ($^{209}Bi^{80+}$), es posible extraer una diferencia ponderada de los desdoblamientos que cancela casi por completo el efecto Bohr-Weisskopf. Ello proporciona una oportunidad única para poner a prueba la QED en el régimen de campos magnéticos intensos.

### ¿Resultado bajo control?

Ullmann y sus colaboradores han conseguido mejorar en más de un orden de magnitud la precisión de las medidas del desdoblamiento hiperfino en ambos estados de carga. Un logro impresionante, si tenemos en cuenta que en su experimento los iones viajaban a velocidades relativistas en un anillo de almacenamiento, lo que requería controlar y corregir con gran precisión el enorme efecto Doppler. Al evaluar la diferencia ponderada, los investigadores hallaron un enorme desacuerdo con respecto a las predicciones de la QED.

No obstante, antes de extraer conclusiones definitivas, deberán descartarse dos posibles explicaciones. En primer lugar, que no haya problemas en los cálculos teóricos, lo que podría afectar a la esperada cancelación del efecto Bohr-Weisskopf. Por otro lado, es posible que la discrepancia se deba a un error en el valor del momento magnético nuclear, obtenido de forma indirecta a partir de un compuesto molecular. Efectuar mediciones similares en otro isótopo ($^{208}Bi$) debería servir para discriminar entre estas posibilidades. En todo caso, cualquiera que sea el resultado de este «rompecabezas hiperfino» reforzará nuestra comprensión sobre la validez de los cálculos de la electrodinámica cuántica en campos externos intensos.

En los próximos años, el estudio de átomos altamente ionizados tal vez siga iluminando otras cuestiones de física fundamental. Por ejemplo, varios avances recientes en el enfriamiento de estos iones abren la puerta a efectuar nuevos tests relativistas y de la QED mediante espectroscopía láser de alta resolución. Los iones dotados de una gran carga eléctrica constituyen asimismo prometedores candidatos para construir relojes atómicos de enorme precisión, ya que sus grandes energías de enlace los hacen prácticamente inmunes a las perturbaciones externas. Además de continuar aumentando los límites de precisión vigentes, tales dispositivos podrían servir como detectores extremadamente sensibles de una posible variación en el tiempo de la constante de estructura fina: otra ventana de «baja energía» a la física más allá del modelo estándar de las partículas elementales.


***Jean-Philippe Karr*** *trabaja en el Grupo de Iones Atrapados del Laboratorio Kastler Brossel, en París, y en la Universidad de Évry-Val d'Essonne.*



Artículo original publicado en *Nature Physics* vol. 13, págs. 533-534, 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2017

Con la colaboración de **nature**



PARA SABER MÁS

**Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL.** Colaboración Muon g-2 en *Physical Review D*, vol. 73, art. 072003, abril de 2006.

**The size of the proton.** Randolf Pohl et al. en *Nature*, vol. 466, págs. 213-216, julio de 2010.

**High precision hyperfine measurements in bismuth challenge bound-state strong-field QED.** Johannes Ullmann et al. en *Nature Communications*, vol. 8, art. 15484, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

**Variación de las constantes.** John D. Barrow y John K. Webb en *IyC*, agosto de 2005.

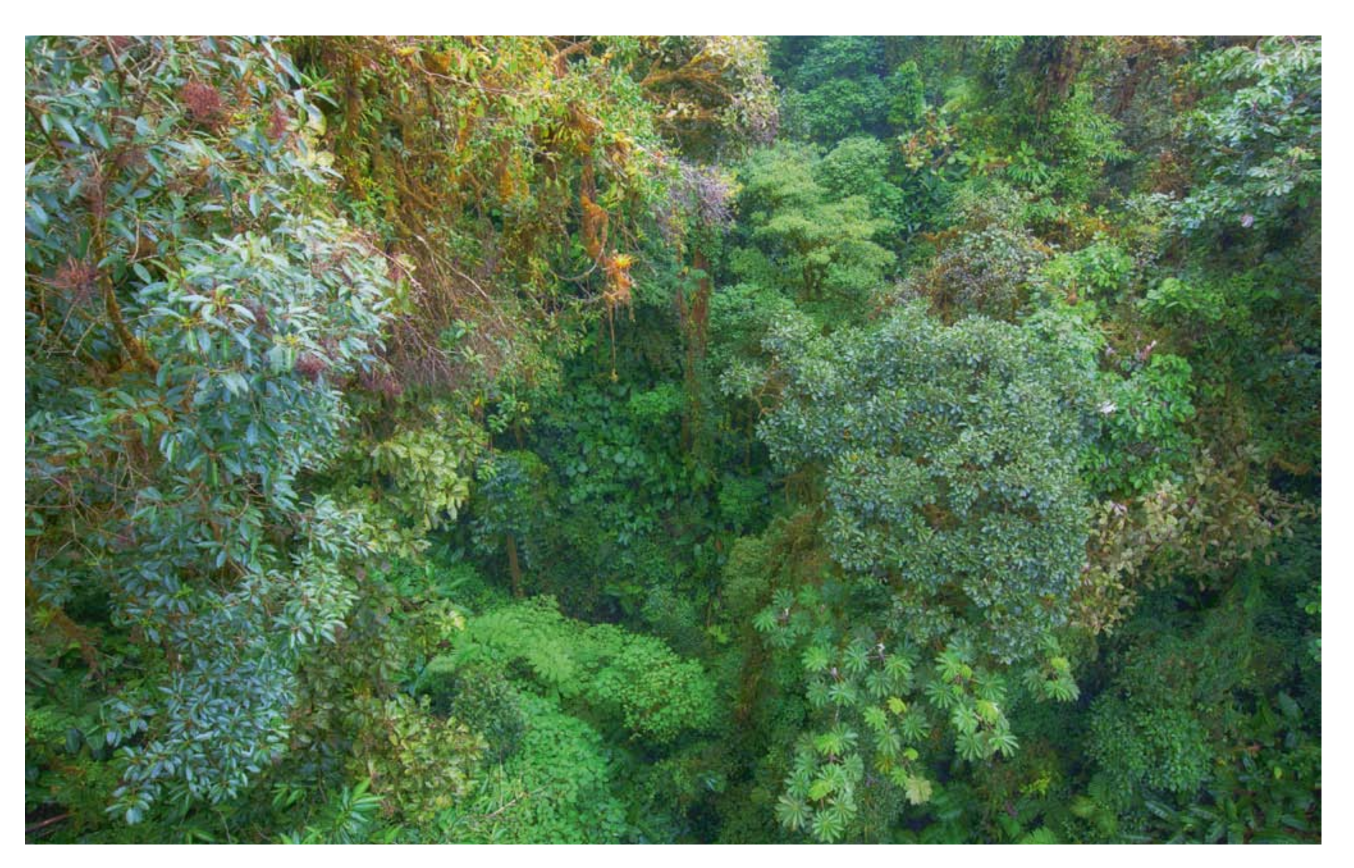
**El problema del radio del protón.** Jan Bernauer y Randolf Pohl en *IyC*, abril de 2014.

ECOLOGÍA

# ¿Por qué la biodiversidad es máxima cerca del ecuador?

Un análisis de datos forestales revela un mecanismo que promovería la coexistencia de las especies en los trópicos y contribuiría a explicar el fenómeno

GARY G. MITTELBACH



**LAS SELVAS TROPICALES**, como la de Monteverde, en Costa Rica, presentan un mayor número de especies arbóreas por unidad de superficie que los bosques templados, un hecho que se atribuye a la mayor competencia entre los individuos de una misma especie en comparación con la que se produce entre especies diferentes.

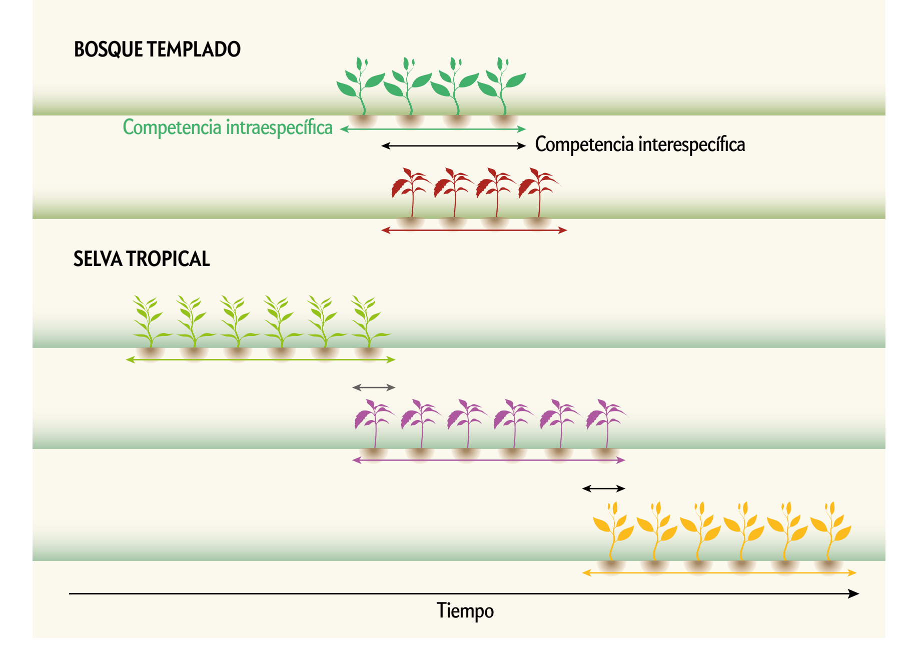
ISTOCKPHOTO/ANZELETTI

Los trópicos bullen con una diversidad biológica que ensombrece la de cualquier otro rincón del planeta. En medio kilómetro cuadrado de la selva de Borneo, es posible contabilizar 1175 especies de árboles, más que las 1166 que integran el inventario de los bosques templados de Europa, Norteamérica y Asia juntas. El impresionante aumento de la riqueza de especies que uno presencia cuando viaja de los polos al ecuador, el gradiente latitudinal de diversidad, es el patrón de biodiversidad más notable de la Tierra. Pero sus causas han desconcertado a los biólogos desde hace más de un siglo, e impulsaron al ecólogo Robert Ricklefs a sostener en una cita hoy célebre que esa pauta «se burla de nuestra ignorancia». En un artículo publicado en *Nature* en octubre de 2017, J. Usinowicz, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y sus colaboradores revelan cómo una teoría ecológica que modeliza la coexistencia de las especies podría esclarecer el gradiente latitudinal de la diversidad arbórea.

Entender el fenómeno exige profundizar en las condiciones que crean la biodiversidad a grandes escalas espaciales, como son la especiación, la extinción y la migración, así como aquellas que hacen posible la coexistencia de un gran número de especies en una comunidad. Varios procesos evolutivos fomentarían las altas tasas de especiación o las bajas tasas de extinción que predominan en los ambientes tropicales con respecto a los templados, procesos que, con el paso del tiempo, generarían una mayor diversidad regional en los trópicos. Pero ¿cómo se mantiene localmente semejante diversidad en un bosque? Usinowicz y sus colaboradores afirman que la coexistencia de las especies es promovida en las selvas tropicales por el hecho de que los efectos negativos a los que cada especie somete a sus miembros (a través de mecanismos como la competencia) son mayores que los que ejerce sobre los miembros de otras especies.

## DIVERSIDAD SEGÚN LA LATITUD

EN LOS BOSQUES TEMPLADOS, la mayor brevedad de la estación favorable hace que la producción de semillas y el crecimiento de las plántulas de las distintas especies (*aquí mostradas en diferentes colores*) sean procesos más simultáneos. Esta sincronía genera un alto grado de competencia intraespecífica e interespecífica, pues las especies experimentan ambientes similares. En cambio, en los trópicos la estación de crecimiento es más dilatada, y la producción de semillas y el crecimiento de las plántulas de las especies coinciden menos en el tiempo. Esto permite a las especies tropicales experimentar condiciones ambientales más diversas, lo que aumenta la intensidad relativa de la competencia intraespecífica con respecto a la competencia interespecífica. Ello fomentaría la coexistencia de las especies y, por tanto, aumentaría la diversidad.






**Recuento de semillas y plántulas**

El equipo de Usinowicz recopiló y analizó un conjunto de datos sobre la producción anual de semillas y la supervivencia de las plántulas (una estimación del «reclutamiento» anual, es decir, de la incorporación de individuos jóvenes de la especie) correspondientes a varios años en una muestra representativa de especies arbóreas en diez bosques y selvas que se extendían desde las cercanías del ecuador hasta los 65º de latitud norte, en Alaska.

Observaron que la simultaneidad (sincronía) del reclutamiento de las plántulas en las diferentes especies era menor en las selvas periecuatoriales que en los bosques circumboreales. Los árboles boreales disponen de una estación de crecimiento más breve que sus iguales tropicales. Esta diferencia latitudinal en la duración de la estación propicia permite a los árboles de los trópicos producir semillas y reclutar plántulas a lo largo de más tiempo que los que crecen en climas templados o boreales.

Pero ¿por qué este hecho fomenta la coexistencia de las especies en los trópicos? Según la teoría ecológica, cualquier factor que haga que los miembros de una especie compitan más intensamente entre sí que con los miembros de otra especie favorecerá la coexistencia de las especies, puesto que la especie en cuestión limitará en mayor medida el crecimiento de su propia población que el de las poblaciones de otras especies.

La asincronía entre árboles en la producción de las semillas puede modificar la intensidad de la competencia intraespecífica con respecto a la competencia interespecífica y, por ende, condicionar la supervivencia del modo siguiente. En los bosques que disponen de una estación de crecimiento corta, todas las especies están forzadas a engendrar y dispersar sus semillas en un plazo de tiempo muy similar, por lo que sus plántulas tendrán que competir con las de muchas otras especies por la luz y los nutrientes. En cambio, si la época de crecimiento es dilatada y las especies producen y dispersan sus semillas en momentos distintos, las interacciones competitivas entre las plántulas se concentrarán en los individuos de la misma especie. Además, si la producción de las semillas está sujeta a una acusada variación interanual, de un año a otro, en los años de producción abundante la competencia intraespecífica será más intensa en las especies cuya reproducción sea asíncrona que en las que sean más sincrónicas (mayor simultaneidad).

Ese vínculo entre los años de «bonanza» reproductiva y la competencia intraespecífica más enconada constituye un elemento clave de la teoría de la coexistencia de las especies, que se denomina efecto de almacenamiento (*storage effect*). El nombre procede de otro aspecto importante del efecto: la influencia positiva que los años prósperos de reclutamiento ejercen en el crecimiento de la población, crecimiento que queda «almacenado» en un estadio vital longevo, como son los árboles adultos en este caso, lo que permitirá a la población resistir los efectos negativos de los años en que el reclutamiento sea escaso.

**Modelo de dinámica forestal**

A fin de someter a prueba la hipótesis de que la variación en el momento del reclutamiento basta para aumentar la probabilidad de la coexistencia específica en las latitudes bajas, Usinowicz y sus colaboradores incorporaron los datos relativos al reclutamiento de las especies en un modelo matemático de la dinámica forestal similar en su forma a la del modelo original del efecto de almacenamiento. De ese modo, comprobaron que la intensidad relativa de la competencia interespecífica con respecto a la competencia intraespecífica descendía en los árboles un 0,25 por ciento por cada grado de latitud que se acercaban al ecuador, efecto que se explicaría por la variación latitudinal del clima. Así pues, la coexistencia de las especies arbóreas en las latitudes bajas, cercanas al ecuador, podría estar fomentada por la mayor competencia intraespecífica en el estadio de plántula.

Los hallazgos del equipo de Usinowicz resultan fascinantes, puesto que otro estudio sobre especies arbóreas realizado por Joseph A. LaManna, de la Universidad de Washington en San Luis, y sus colaboradores ha constatado también una acusada variación latitudinal en la intensidad de las interacciones intraespecíficas

con respecto a las interespecíficas, si bien a través de otro mecanismo ecológico. Los autores de esa investigación, llevada a cabo en 24 parcelas forestales repartidas por el globo, hallaron que el crecimiento y la supervivencia de los plantones se veían más perjudicados por la densidad de los árboles circundantes de su misma especie que por la de los árboles de especies ajenas. Es más, este fenómeno de dependencia negativa de la densidad resultó aún más pronunciado en las especies infrecuentes de las selvas tropicales que en las de los bosques templados, factor que también fomentaría la coexistencia de las especies en los trópicos. El trabajo de Usinowicz y este otro estudio aportan pruebas complementarias de que la rica diversidad de los árboles tropicales podría verse favorecida por mecanismos ecológicos que dan lugar a especies que ejercen una autolimitación intraespecífica más fuerte que la ejercida por las especies forestales de latitudes templadas y boreales.

El trabajo de Usinowicz ha demostrado una relación lineal entre la latitud y la intensidad relativa de la competencia intraespecífica con respecto a la interespecífica, intensidad que aumenta con la cercanía al ecuador. Con todo, el número y la distribución geográfica de los estudios de los que han tomado los datos para su análisis no son todo lo ideales que cabría desear. No se han considerado lugares de África, Europa ni Asia central, mientras que cinco de los diez bosques están radicados en islas. Asimismo, sería de esperar que la relación entre la latitud y la sincronía del reclutamiento (y la intensidad relativa de la competencia intraespecífica) no fuera lineal y que cambiase más abruptamente en el límite septentrional y meridional de los trópicos (a unos 23º de latitud a ambos lados del ecuador). La resolución de estas preguntas exigirá nuevos estudios a largo plazo sobre la dinámica del reclutamiento en los bosques y las selvas de todo el planeta, así como otros que examinen de qué modo varía la intensidad del efecto de almacenamiento con la latitud en otros seres vivos. No obstante, ese trabajo es para otro día: ahora es el momento de que los ecólogos nos deleitemos con los datos que vinculan mecanismos fundamentales de la coexistencia de las especies con los patrones a gran escala del clima y de la biodiversidad.

***Gary G. Mittelbach*** *es profesor de la Estación Biológica Kellogg y del Departamento de Biología Integradora de la Universidad Estatal de Michigan*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 550, págs. 51-52, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

**Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of species coexistence.** J. S. Wright en *Oecologia*, vol. 130, págs. 1-14, 2002.

**Temporal coexistence mechanisms contribute to the latitudinal gradient in forest diversity.** J. Usinowicz et al. en *Nature*, vol. 550, págs. 105-108, 2017.

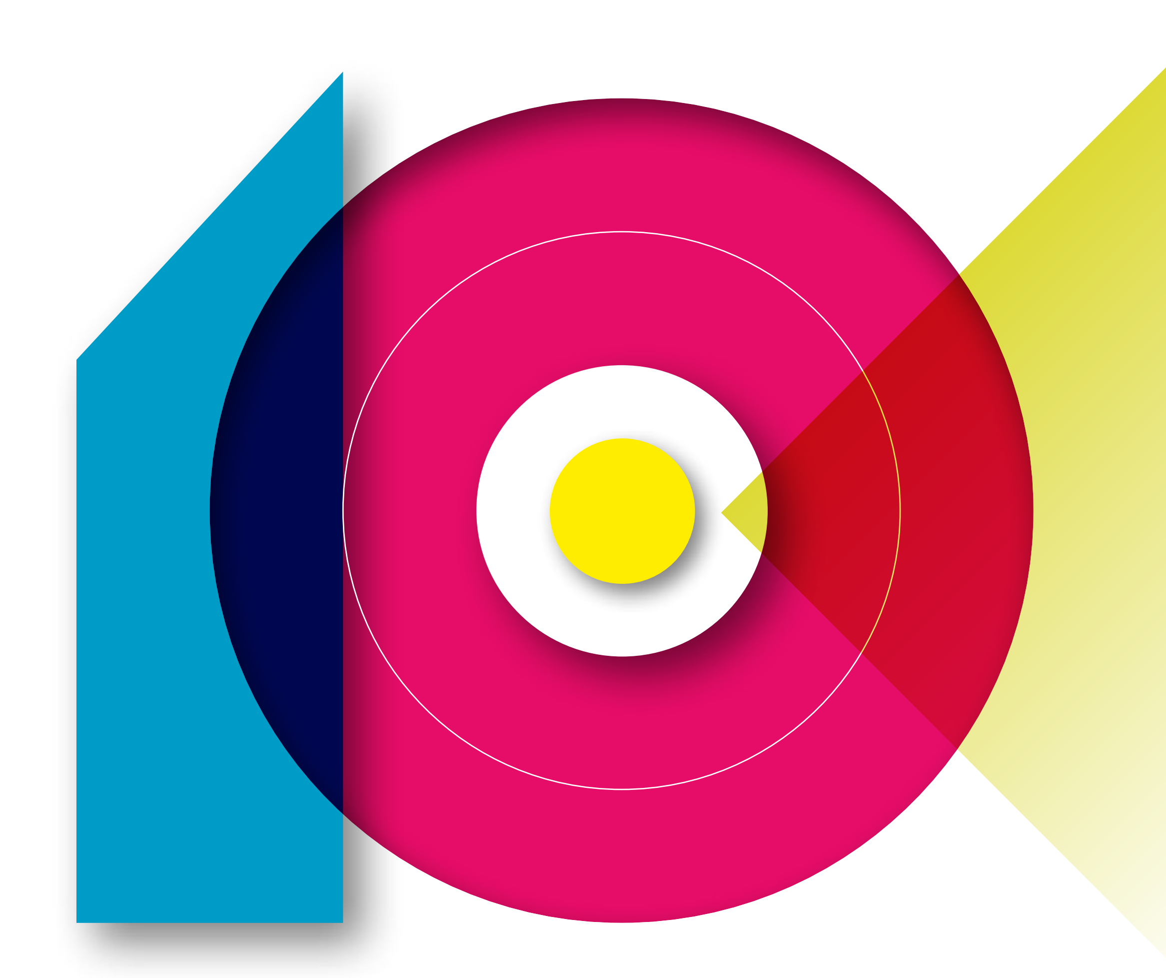
**Plant diversity increases with the strength of negative density dependence at the global scale.** J. A. LaManna et al. en *Science*, vol. 356, págs. 1389-1392, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

**¿Qué mecanismos regulan la distribución de la biodiversidad?** Andrés Baselga en *IyC*, julio de 2014.







ILUSTRACIONES DE ERIC PETERSEN

INFORME ESPECIAL

# LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO

SOLUCIONES DISRUPTIVAS QUE SE HALLAN EN DISPOSICIÓN DE TRANSFORMAR EL MUNDO

# ¿Qué ocurriría

si fuera posible extraer agua potable del aire del desierto sin necesidad de que una red suministrase grandes cantidades de electricidad? ¿Y si un médico pudiera realizar una biopsia para diagnosticar un cáncer sin bisturí de ningún tipo? ¿Y si casi no hubiera que esperar para saber el resultado? Dentro de pocos años, los medios técnicos que hagan posibles estos y otros avances podrían ser cada vez más corrientes. El presente informe, elaborado en colaboración con expertos del Foro Económico Mundial y otras instituciones, destaca diez de tales innovaciones.

Para seleccionarlas hemos reunido a un comité formado por especialistas de renombre mundial. El grupo propuso recomendaciones y recibió sugerencias de dos organismos del Foro Económico Mundial (la Red de Expertos y los Consejos para un Futuro Global), así como de varios miembros del consejo de asesores de *Scientific American* y de otros eruditos ligados a la investigación y desarrollo en los ámbitos académico, empresarial y gubernamental. El comité se centró en aquellas que, sin encontrarse aún muy extendidas, atraen cada vez más financiación o muestran indicios de estar listas para pasar a la siguiente etapa. Las elegidas debían, además, redundar en beneficios significativos para la sociedad y la economía, así como contar con la capacidad para cambiar la forma establecida de hacer las cosas.

*—Mariette DiChristina y Bernard S. Meyerson*


EN SÍNTESIS

**En el ámbito sanitario,** mejores técnicas de biopsia, vacunas genéticas y un descomunal proyecto global para cartografiar cada una de las células humanas redundarán en un gran beneficio para la salud pública y la medicina personalizada.

**Proporcionar de manera sostenible** los recursos necesarios a una población creciente será posible gracias a los avances logrados en fotosíntesis artificial, capaz de producir combustibles renovables, así como en los sistemas de captación de agua que usan energía solar. La transmisión de información en tiempo real convertirá la agricultura de precisión en una forma eficiente de alimentar a cada vez más personas.

**Las técnicas ecológicas** resultan cada vez más accesibles. Bloques enteros de casas pueden transformarse en comunidades con cero emisiones. Las nuevas propuestas en pilas de combustible de hidrógeno podrían traducirse en automóviles sin gasolina más económicos.

**Las mejoras en visión artificial** y en computación cuántica prometen un futuro en el que las máquinas interpretarán datos y resolverán problemas complejos mejor que los seres humanos.





SALUD PÚBLICA

## AGUA A PARTIR DEL SOL

### LAS TÉCNICAS QUE EXTRAEN LA HUMEDAD DEL AIRE YA FUNCIONAN CON ENERGÍA SOLAR

*Donna J. Nelson y Jeffrey Carbeck*

**Miles de millones de personas** carecen de acceso regular a agua potable o deben realizar largos viajes para abastecerse, por lo que la posibilidad de extraerla directamente del aire les supondría una ayuda inconmensurable. Sin embargo, las técnicas existentes suelen requerir un clima muy húmedo y grandes cantidades de electricidad. La solución parece cada vez más cerca gracias al desarrollo de sistemas que aprovechan la energía solar. En principio, podrían aplicarse a gran escala y funcionan incluso en regiones áridas, donde vive un tercio de la población mundial, a menudo en condiciones de pobreza.

Una colaboración entre el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la Universidad de California en Berkeley ha concebido un método que no requiere electricidad. Los investigadores esperan que su técnica resuelva un importante problema del que adolecen la mayoría de los materiales capaces de adsorber agua de la atmósfera, como las zeolitas de los deshumidificadores: además de necesitar porcentajes elevados de humedad, solo liberan el agua tras calentarse de manera sustancial, con el consiguiente consumo de energía.

El nuevo sistema ha sido diseñado a partir de «armazones organometálicos» (MOF), cierto tipo de cristales porosos desarrollados hace años por Omar M. Yaghi, de Berkeley. Las propiedades químicas de cada MOF pueden ajustarse mediante combinaciones específicas de metales y moléculas orgánicas, lo que permite múltiples usos. Aparte de la versatilidad, su aspecto más prometedor reside en las fenomenales dimensiones de sus poros, con un área superficial interna casi 10 veces mayor que la de las zeolitas. Para hacerse una idea, un gramo de MOF del tamaño de un terrón de azúcar posee una superficie similar a la de un campo de fútbol.

En abril del año pasado, el grupo de Yaghi, junto con el del ingeniero del MIT Evelyn Wang, refirió los resultados obtenidos con un prototipo basado en el MOF-801, o fumarato de circonio, el cual pre-



senta una elevada hidrofilia. La humedad del aire queda capturada en los enormes poros del material, que inmediatamente vierte el agua en un colector como reacción al calor natural de la luz del sol. El invento recoge 2,8 litros de agua al día por cada kilogramo de MOF, incluso con humedades relativas de tan solo el 20 por ciento, un nivel típico de los desiertos (según Yaghi, una persona necesita al menos 355 mililitros de agua potable al día). Además, no requiere aportes adicionales de energía. Los investigadores ven espacio para la mejora: experimentar con la composición de los MOF podría abaratar la técnica (en la actualidad, el kilogramo de circonio cuesta 150 dólares), aumentar la cantidad de agua recolectada por unidad de material y permitir adaptar los MOF a distintos microclimas.

En Scottdale, Arizona, la compañía Zero Mass Water ha puesto a la venta otro dispositivo basado en energía solar que no necesita estar conectado a una red eléctrica o a un sistema de agua preexistente. Una placa solar proporciona la energía que impulsa el aire a través de un material de absorción patentado y que también hace condensar la humedad extraída. Gracias a una pequeña batería de iones de litio, el aparato funciona incluso cuando no brilla el sol. Según la empresa, una unidad con un solo panel puede producir entre dos y cinco litros de agua al día. Esta se almacena en un depósito de 30 litros, donde se le añade calcio y magnesio por motivos de salud y de sabor.

Cody Friesen, fundador de Zero Mass Water y científico de materiales de la Universidad Estatal de Arizona, desarrolló este sistema con la intención de que pudiera implantarse de manera sostenible y sin complicaciones en cualquier parte del mundo. En EE.UU. se vende e instala por unos 3700 dólares, precio que incluye un cargo del 10 por ciento destinado a disminuir los costes de instalación en lugares sin infraestructuras. Friesen señala que la misma unidad puede servir tanto para reducir la demanda de agua embotellada como para abastecer de agua potable a un colegio que carezca de ella.

Durante los últimos meses, asegura, se han instalado sistemas de este tipo en el suroeste de EE.UU. y en varios países más, como México, Jordania y Emiratos Árabes Unidos. Hace poco, gracias a los fondos de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU., la compañía envió paneles al Líbano para proveer de agua a los refugiados sirios. Al hablar de energía solar, la mayoría de las personas piensan en electricidad, apunta Friesen. «En el futuro, pensarán en la abundancia de agua.»

**COMITÉ DE EXPERTOS**

**Mariette DiChristina,** presidenta del comité, es redactora jefa de *Scientific American* y directora de edición, publicación y revistas de Nature Research Group de Springer Nature.

**Bernard S. Meyerson,** vicepresidente del comité, es director de innovación de IBM. Miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EE.UU., ha recibido numerosos galardones por su trabajo en física, ingeniería y economía.

**Nayef Al-Rodhan,** filósofo, neurocientífico y geoestratega, es miembro honorífico del St. Antony's College de la Universidad de Oxford e investigador titular y director del Programa de Futuro Global y Geopolítica del Centro para la Política de Seguridad de Ginebra.

**Elizabeth H. Blackburn,** ganadora del premio Nobel de medicina en 2009, es presidenta del Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla. Ha recibido los premios Lasker, Gruber y Gairdner y es coautora de *The telomere effect*.

**Jeffrey Carbeck** ha fundado varias compañías y dirige el departamento de materiales avanzados y prácticas de fabricación en Deloitte Consulting. Es miembro del Consejo de Materiales Avanzados del Foro Económico Mundial.

**Vinton G. Cerf*,** vicepresidente de Google, es reconocido por muchos como uno de los padres de Internet. Forma parte del Consejo Nacional de Ciencias de EE.UU. y es científico visitante del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA.

**Javier García Martínez** es profesor de química inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante. Cofundador de la empresa Rive Technology, en 2009 fue elegido Líder Joven Global por el Foro Económico Mundial.

**Daniel M. Kammen*** es catedrático de energía en la Universidad de California en Berkeley, en el Grupo de Energía y Recursos, la Escuela Goldman de Políticas Públicas y el Departamento de Ingeniería Nuclear. Es director fundador del Laboratorio de Energía Renovable y Apropiada de Berkeley.

**Christof Koch*** es conocido por explorar las bases neuronales de la consciencia en humanos y animales. Es presidente del Instituto Allen de Ciencias del Cerebro en Seattle y catedrático de biología e ingeniería en el Instituto de Tecnología de California.

**Sang Yup Lee** es profesor distinguido de ingeniería química y biomolecular en el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea (KAIST). Cuenta con 610 patentes y es copresidente del Consejo de Biotecnología del Foro Económico Mundial.

**Geoffrey Ling,** coronel retirado del Ejército de EE.UU., es profesor de neurología en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados y en la Universidad Johns Hopkins. Ha ocupado puestos de liderazgo en la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa y en la Oficina de Políticas de Ciencia y Tecnología de la Casa Blanca.

**Apurv Mishra** es director de tecnología en doc.ai, una empresa de inteligencia artificial enfocada a la atención sanitaria. Ha sido director de operaciones en Datawallet, fundador de Glavio, vicepresidente de Hypios y miembro del Consejo de la Agenda Global sobre Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial.

**Donna J. Nelson** es catedrática de química en la Universidad de Oklahoma. Ha sido presidenta de la Sociedad Americana de Química y ha trabajado como asesora científica en la serie *Breaking bad*.

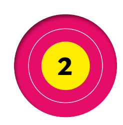
**David Peters,** experto en automatización, es presidente, director ejecutivo y fundador de Universal Robotics, una empresa de inteligencia artificial especializada en sistemas de control reactivo basados en sensores.

**AUTORES INVITADOS**

**Blake Bextine** es director de programas en la Oficina de Tecnologías Biológicas de la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa. Fue profesor de biología y vicepresidente adjunto de transferencia tecnológica en la Universidad de Texas en Tyler.

**Darío Gil** es vicepresidente de ciencias y soluciones de IBM Research. Es responsable del programa científico de IBM en física, matemáticas y ciencias de la vida, además de en investigación cognitiva y de cadena de bloques.

*Miembro del consejo de asesores de *Scientific American*



ENERGÍA

# COMBUSTIBLE DE PLANTAS ARTIFICIALES

## UNA ESTRATEGIA QUE IMITA A LA FOTOSÍNTESIS CONVIERTE EL DIÓXIDO DE CARBONO EN COMBUSTIBLE

*Javier García Martínez*

**Las hojas de las plantas** aprovechan la energía del sol para transformar el $CO_2$ en los carbohidratos que necesitan. Durante decenios, los científicos han intentado idear un proceso similar con el fin de generar combustible que pueda almacenarse para su uso posterior. Ello resolvería uno de los principales inconvenientes que plantea la generación solar y eólica, ya que proporcionaría una manera de guardar la energía para cuando no brille el sol ni sople el viento.

A lo largo de los años, numerosos investigadores han contribuido al desarrollo de una forma de fotosíntesis artificial consistente en disociar, mediante la acción de catalizadores activados por la luz del sol, las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno. La fotosíntesis real se encontraría un paso más cerca si dicho hidrógeno se empleara en una reacción de reducción para convertir el $CO_2$ en hidrocarburos. Al igual que una verdadera hoja, ese proceso solo usaría $CO_2$, agua y la luz del sol para producir combustible. Tal logro supondría una revolución, puesto que permitiría crear un sistema cerrado en el que el $CO_2$ emitido en la combustión volvería a transformarse en combustible, en vez de sumarse a los gases de efecto invernadero ya presentes en la atmósfera.

Varios investigadores persiguen ese objetivo. Hace poco, un grupo demostró la posibilidad de combinar en un solo sistema muy eficiente la descomposición del agua y la conversión de $CO_2$ en combustible. En un artículo publicado en junio de 2016 en *Science*, Daniel G. Nocera y Pamela A. Silver, de Harvard, y sus colaboradores describieron una técnica para fabricar combustible líquido (aceite de fusel) que superaba con creces la conversión de $CO_2$ en carbohidratos en una hoja natural: mientras que una planta usa solo el 1 por ciento de la energía que recibe del sol para producir glucosa, la nueva técnica logró una eficiencia de conversión a combustible de en torno al 10 por ciento.

Los investigadores combinaron la técnica de fotólisis del agua (diseñada para utilizar solo materiales biocompatibles y evitar que se originen compuestos tóxicos) con bacterias modificadas ex profeso para producir combustible. Para su sorpresa, los microorganismos generaron una amplia variedad de combustibles y otros compuestos incluso a bajas concentraciones de $CO_2$. El proceso está listo para su aplicación a mayor escala, hasta el punto de que los catalizadores ya contienen metales baratos y fáciles de obtener. Sin embargo, todavía es necesario aumentar de manera sustancial la producción de combustible. Nocera asegura que su equipo ya trabaja en un prototipo y que está en negociaciones con varias empresas.

Pero el experto mira aún más allá. Además de generar de forma sostenible hidrógeno y combustibles ricos en carbono, ha demostrado que, con otro tipo de bacterias modificadas, resulta posible obtener abonos nitrogenados directamente en el suelo, una estrategia que aumentaría el rendimiento de los cultivos allí donde no sea fácil disponer de abonos al uso. Los microorganismos usan el hidrógeno y el $CO_2$ para formar cierto tipo de plástico biológico. Una vez que la bacteria contiene suficiente plástico, ya no necesita la luz del sol, por lo que puede enterrarse en el suelo. Tras extraer nitrógeno del aire, aprovecha la energía y el hidrógeno del plástico para producir el abono. Rábanos que fueron cultivados en una tierra con estos microorganismos acabaron pesando un 150 por ciento más que las plantas de control.

> El logro permitiría crear un sistema cerrado en el que el $CO_2$ emitido en la combustión volvería a transformarse en combustible

Nocera admite que, en un principio, llevó a cabo la prueba del abono por pura curiosidad. Sin embargo, prevé un futuro en el que las bacterias «respirarán hidrógeno» procedente de la descomposición del agua y, al final, lo usarán para producir combustibles, abonos, plásticos o fármacos, dependiendo de las modificaciones metabólicas específicas a las que hayan sido sometidas.








COMPUTACIÓN

# INTELIGENCIA ARTIFICIAL, VISIÓN HUMANA

## EL APRENDIZAJE PROFUNDO TRANSFORMARÁ LA MEDICINA Y NUMEROSOS SECTORES

*Apurv Mishra*

**Durante gran parte de los últimos 30 años,** las técnicas de visión artificial han fracasado a la hora de ejecutar tareas tan mundanas como reconocer rostros en una fotografía. Sin embargo, los recientes avances en aprendizaje profundo han hecho posible que, por fin, los ordenadores logren interpretar imágenes con igual o mejor tino que los humanos. Ya existen productos comerciales que explotan esta técnica, la cual es probable que acabe realizando total o parcialmente varios trabajos desempeñados hasta ahora por personas, desde conducir camiones hasta interpretar escáneres médicos.

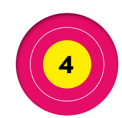
En este contexto han resultado clave los progresos logrados con la técnica de aprendizaje profundo conocida como redes neuronales convolucionales (RNC). Por poner un ejemplo, considere un conjunto de fotos de animales. Mientras que los humanos podemos distinguir con facilidad entre un gato y un perro, las RNC permiten a las máquinas clasificar por razas con mayor acierto que una persona. Ello se debe a una mejor capacidad para aprender y hacer deducciones a partir de pautas sutiles.

No hace falta programar las RNC para que reconozcan características específicas, como la forma y el tamaño de las orejas de un animal. En su lugar, se les enseña a que detecten tales rasgos por sí mismas. Para entrenar una RNC y que sepa diferenciar un springer spaniel inglés de uno galés se comienza con miles de fotos de ambas razas. Como casi todas las redes de aprendizaje profundo, las RNC se organizan en capas. En las inferiores se aprenden formas y bordes simples, mientras que las superiores están reservadas para detalles complejos; en este caso, los aspectos más sutiles de las orejas, la cola, la lengua o la textura del pelaje. Una RNC ya entrenada puede determinar con facilidad si una nueva imagen muestra alguna raza de interés.

Los avances en procesadores gráficos y en procesamiento en paralelo logrados en el último decenio han hecho posibles las RNC. Pero a ellas también ha contribuido Internet, gracias a la disponibilidad de un ingente número de imágenes digitalizadas.

Ahora se están desarrollando sistemas de visión computarizada para toda una variedad de aplicaciones. Los vehículos autónomos son más seguros gracias a las mejoras a la hora de reconocer peatones. Las aseguradoras están empezando a aplicar estas herramientas para evaluar los daños en automóviles. En videovigilancia, las RNC ayudan a comprender el comportamiento de las multitudes, lo que aumentará la seguridad de aeropuertos y otros lugares públicos. En agricultura, el aprendizaje profundo puede usarse para predecir el rendimiento de cultivos, monitorizar los niveles de agua y detectar plagas antes de que se propaguen.

El aprendizaje profundo para tareas visuales está encontrando uno de sus campos más prometedores en medicina, donde puede servir para interpretar con celeridad escáneres y muestras patológicas, así como para proporcionar información clave donde no haya profesionales con formación suficiente para analizar imágenes, ya sea para diagnosticar enfermedades o para evaluar la respuesta de un paciente ante una terapia. El año pasado, la Administración de Fármacos y Alimentos de EE.UU. aprobó un método desarrollado por la compañía Arterys para visualizar el flujo sanguíneo en el corazón y ayudar a diagnosticar enfermedades cardíacas. También en 2017, Sebastian Thrun, de Stanford, y sus colaboradores presentaron en *Nature* un sistema que clasificaba el cáncer de piel con tanto acierto como los dermatólogos. Los investigadores señalaron que una aplicación así instalada en los teléfonos móviles proporcionaría «acceso universal y de bajo coste a una asistencia diagnóstica vital». Además, se están desarrollando sistemas para evaluar retinopatías diabéticas (causantes de ceguera), derrames cerebrales, fracturas de huesos, alzhéimer y otros trastornos.




INGENIERÍA

# AGRICULTURA DE PRECISIÓN

## SENSORES, IMÁGENES Y ANÁLISIS DE DATOS EN TIEMPO REAL MEJORARÁN LA PRODUCCIÓN Y REDUCIRÁN LOS RESIDUOS

***Geoffrey Ling y Blake Bextine***

**Conforme crezca la población mundial** será necesario producir más alimentos. Pero la superficie cultivable no podrá mantener el ritmo, y la inminente amenaza sobre la seguridad alimentaria podría causar inestabilidades regionales o incluso globales. Para adaptarse, los grandes cultivos optan cada vez más por la agricultura de precisión para aumentar la producción, reducir los residuos y mitigar los riesgos económicos y de seguridad.

En la agricultura tradicional, la gestión de campos enteros (que implica tomar decisiones relacionadas con la siembra, la cosecha, el riego y la aplicación de plaguicidas y abonos) se basa en las condiciones de la región y en datos históricos. En cambio, la agricultura de precisión emplea sensores, robots, GPS, herramientas cartográficas y análisis de datos para individualizar el cuidado de las plantas, todo ello sin incrementar la mano de obra. Los sensores, estáticos o instalados sobre robots, y los drones equipados con cámaras envían imágenes y datos de plantas concretas (el tamaño del tallo, la forma de las hojas o la humedad del suelo, por ejemplo) a un ordenador que evalúa su estado. Los agricultores, según los resultados que reciben en tiempo real, esparcen agua, plaguicidas o abonos en dosis calibradas solo allí donde hace falta. La tecnología también ayuda a decidir cuándo plantar y cosechar.

La agricultura de precisión conduce así a una mejor gestión del tiempo, a un menor consumo de agua y compuestos, así como a cultivos más sanos y con mayores rendimientos. Todo ello redunda en un beneficio neto para los agricultores, permite ahorrar recursos y disminuir el vertido de residuos.

Numerosas compañías emergentes están creando programas, sensores, sistemas aéreos de recogida de datos y otras herramientas destinadas a la agricultura de precisión, un camino que también siguen gigantes como Monsanto, John Deere, Dow y DuPont. En EE.UU., el Departamento de Agricultura, la NASA y la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano respaldan la práctica, y muchas facultades ofertan ya cursos al respecto.

También los productores de semillas están recurriendo a la tecnología para mejorar la «fenotipificación» de las plantas. Al observar especímenes a lo largo del tiempo y analizar cuáles florecen bajo qué

condiciones, las empresas pueden correlacionar la respuesta de los cultivos con el entorno y su genómica. Esa información permite producir variedades de semillas que prosperarán en condiciones específicas de suelo y clima. Los métodos avanzados de fenotipificación también podrían ayudar a mejorar las propiedades nutricionales de los cultivos.

Con todo, son varias las razones por las que los productores no están abrazando en masa la agricultura de precisión. Una de ellas es la inversión inicial en equipos; en especial, el gasto que conlleva ampliar la técnica a grandes cultivos en hilera. Otras son la ausencia de banda ancha en ciertas zonas; el hecho de que algunos agricultores veteranos pueden mostrarse reacios al uso de la tecnología; y que parte de ella no estaría al alcance de muchas explotaciones pequeñas en países en desarrollo. Sin embargo, cabe aplicar fórmulas más baratas y simples. Salah Sukkarieh, de la Universidad de Sídney, ha probado en Indonesia un sistema simplificado y de bajo coste que funciona con energía solar y teléfonos móviles. Otros, por el contrario, consideran que el ahorro a largo plazo compensará la inversión. Y, por reticentes que sean hoy algunos agricultores a las nuevas tecnologías, la próxima generación se sentirá entusiasmada.

*Las opiniones y los resultados expuestos en este artículo proceden de los autores y no representan la visión oficial ni las ideas de la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa (DARPA) ni del Departamento de Defensa de Estados Unidos.*




BIOMEDICINA

# CARTOGRAFIAR CADA CÉLULA

## UN PROYECTO GLOBAL ASPIRA A ENTENDER CÓMO FUNCIONAN TODAS LAS CÉLULAS HUMANAS

*Sang Yup Lee*

**Para entender de verdad** cómo funciona el cuerpo humano y cómo nacen las enfermedades se necesitaría disponer de una extraordinaria cantidad de información. Entre otros detalles, habría que conocer la identidad de cada tipo de célula en cada tejido; qué genes, proteínas y otras moléculas se encuentran activos en ellas; qué procesos controlan esa actividad; dónde se ubican exactamente las células; cómo suelen interaccionar entre sí, y qué le ocurre a nuestro cuerpo cuando una célula sufre cambios de orden genético o de otro tipo.

Aunque la tarea de construir una base de conocimiento tan rica y compleja se antoja casi imposible, un amplio consorcio de grupos de investigación de todo el mundo ha dado los primeros pasos para crear precisamente eso. Lo denominan el Atlas Celular Humano.

El consorcio celebró su reunión inaugural en octubre de 2016 y aún continúa estructurándose. En 2017, la Iniciativa Chan Zuckerberg anunció que proporcionaría apoyo financiero y técnico para construir una plataforma abierta de coordinación de datos que permitiese organizar los hallazgos y los resultados, a fin de que los investigadores puedan compartirlos con facilidad.

El atlas, que combinará información proveniente de proyectos de investigación presentes y futuros, será viable gracias a numerosos avances técnicos; entre ellos, herramientas para aislar células individuales, para caracterizar el perfil proteico de una de ellas en un momento determinado, así como para secuenciar de forma rápida y económica ADN y ARN. También integrará las investigaciones que exploren todos los *-omas*: el genoma (el conjunto de genes), el transcriptoma (ARN), el proteoma (proteínas), el metaboloma (moléculas como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos, implicadas en los procesos celulares) y el fluxoma (reacciones metabólicas). Los resultados se cartografiarán en diferentes subregiones celulares y su integración debería conducir a un instrumento con el que simular todos los tipos y estados de las células del cuerpo, lo que permitirá obtener nuevos conocimientos sobre los procesos relacionados con la enfermedad y cómo intervenir en ellos.

Uno de los recursos más avanzados de este mapa celular lo constituye el Atlas de las Proteínas Humanas, en continua actualización. Los participantes de este proyecto han clasificado la mayoría de los genes que codifican proteínas, empleando para ello una combinación de genómica, transcriptómica, proteómica y el estudio de anticuerpos. Desde el inicio del programa, en 2003, se ha dedicado el equivalente al trabajo de una persona durante cien años para desarrollar el *software* de registro y organización de datos. Los patólogos han generado y anotado más de 10 millones de imágenes. El atlas incluye un mapa de alta resolución de la localización de más de 12.000 proteínas en 30 orgánulos (compartimentos subcelulares) de varias células.

Todos los hallazgos se hallan a libre disposición de la comunidad investigadora. Los usuarios pueden consultar la base de datos para explorar las proteínas de cualquier órgano o tejido importante, o pueden centrarse en proteínas con propiedades específicas, como las que participan en el mantenimiento celular o las que se producen solo en tejidos concretos. Los datos ayudan también a modelizar la gran multitud de componentes dinámicos que interaccionan entre sí y posibilitan la vida, y pueden destinarse a explorar nuevas terapias.

Completar el Atlas Celular Humano no será sencillo, pero se convertirá en una herramienta de un valor incalculable para mejorar y personalizar la atención sanitaria.




BIOMEDICINA

# BIOPSIAS LÍQUIDAS

## ANÁLISIS DE SANGRE ULTRASENSIBLES PROMETEN MEJORAR EL DIAGNÓSTICO DEL CÁNCER Y SU TRATAMIENTO

***Apurv Mishra***

**Por lo general,** el diagnóstico de un cáncer exige someter al paciente a una prueba de imagen y a una biopsia. En ella se extraen muestras del tumor, se examinan al microscopio y, a menudo, se analizan para identificar las mutaciones genéticas. Esa información ayuda a determinar el tipo de cáncer, su grado de evolución y el mejor tratamiento. Sin embargo, en ocasiones resulta imposible efectuar una biopsia, como cuando el tumor es de difícil acceso. La obtención y análisis de tejidos puede ser también una labor costosa y lenta. Y, dado que las biopsias son invasivas, existe el riesgo de infecciones y otras complicaciones.

Una herramienta conocida como biopsia líquida, capaz de detectar indicios de cáncer en una simple muestra de sangre, constituye la gran promesa al respecto. Varias docenas de empresas están desarrollando sus propias técnicas y los analistas predicen un mercado de miles de millones de dólares. La idea se basa en detectar el ADN tumoral circulante (ADNtc), el material genético que las células cancerosas tienden a liberar en el torrente sanguíneo. Solo ciertas técnicas recientes han posibilitado encontrar y secuenciar este ADN de forma rápida y económica.

Por el momento, los análisis que ofrecen diversas compañías ayudan a decidir el tratamiento en pacientes a quienes ya se les ha diagnosticado una forma concreta de cáncer, como el de próstata o el de pulmón. Sin embargo, las pruebas líquidas prometen servicios que se hallan fuera del alcance de las biopsias de tejidos. En principio, una secuencia de análisis repetidos podría detectar una evolución de la enfermedad o una resistencia al tratamiento mucho antes de que se desencadenen los síntomas o de que tales aspectos se manifiesten en una prueba de imagen. Las biopsias de tejido examinan solo porciones concretas de un tumor, por lo que pueden pasar por alto células peligrosas. En cambio, las biopsias líquidas tienen el potencial de revelar el cuadro completo de mutaciones en una masa tumoral y señalar cuándo se necesita un tratamiento más contundente. Un aspecto clave es que, en el futuro, este tipo de pruebas podrían ayudar a detectar un cáncer en personas que parezcan perfectamente sanas.

En marzo del año pasado, GRAIL, una compañía escindida de Illumina, recaudó 900 millones de dólares de inversores como Amazon y varias farmacéuticas para desarrollar la tecnología y realizar los grandes ensayos clínicos (con cientos de miles de sujetos) necesarios para comprobar su viabilidad. También en marzo, Freenome recibió 65 millones de dólares para ensayos clínicos destinados a determinar si estas pruebas mejoran la evolución de los pacientes. Y en mayo, Guardant Health anunció que había recaudado 360 millones de dólares que, sumados a inversiones previas, permitirán aplicar biopsias líquidas a un millón de personas durante el próximo lustro.

Para que se extienda el uso de estos análisis, los ensayos habrán de demostrar que la técnica puede detectar el cáncer con precisión y que, al ayudar a determinar el tratamiento, mejorará la evolución de la enfermedad y aumentarán las tasas de supervivencia.




TRANSPORTE

# COCHES DE HIDRÓGENO PARA LAS MASAS

## CATALIZADORES CON MENOS METALES PRECIOSOS Y, POR TANTO, MÁS BARATOS

***Donna J. Nelson***

**Los vehículos eléctricos,** alimentados por baterías y que no emiten $CO_2$, están a punto de convertirse en algo común. En la actualidad dan cuenta de menos del 1 por ciento del parque automovilístico mundial, pero varias mejoras en el coste y la duración de las baterías han propiciado unos precios tan competitivos que la empresa Tesla ya ha recibido más de 400.000 pedidos de su Model 3, de 35.000 dólares, el cual se prevé que entre en circulación a mediados de 2018.

Por desgracia, la otra gran esperanza para los vehículos sin emisiones, aquellos que funcionan con pilas de combustible de hidrógeno, sigue costando demasiado. El Toyota Mirai, por ejemplo, asciende a 57.500 dólares. Sin embargo, varios laboratorios y compañías están decididos a reducir gastos sustituyendo uno de los componentes más onerosos de las pilas de combustible: el catalizador. Numerosas versiones comerciales contienen platino, un metal que, aparte de caro, es demasiado escaso para que se popularice su uso en vehículos.

Existen varias líneas de ataque para disminuir el uso de platino: emplearlo de forma más eficiente; sustituirlo total o parcialmente por paladio (con un rendimiento similar pero más económico); reemplazar los metales preciosos por otros más




BIOMEDICINA

# VACUNAS DE ADN O ARN

## LAS VACUNAS GENÉTICAS PODRÍAN CAMBIAR LA LUCHA CONTRA LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS

***Geoffrey Ling***

**Las vacunas estándar** constan de patógenos muertos, debilitados o de proteínas de esos microorganismos. Actúan enseñando al sistema inmunitario a identificar como enemigos ciertos antígenos, fragmentos de proteína presentes en la superficie del patógeno. De esta manera, la próxima vez que el cuerpo los encuentre, estará preparado para atacarlos. Por su parte, las vacunas concebidas para tratar el cáncer se basan asimismo en administrar proteínas para mejorar la respuesta inmunitaria, las cuales pueden incluir anticuerpos.

Un nuevo tipo de vacuna destinada a lograr grandes avances está compuesta de genes. Ello promete numerosas ventajas; entre ellas, una producción más rápida en caso de que un virus se propague de repente o se torne más virulento, como ha ocurrido con el zika o el ébola. Aunque llevan decenios en preparación, es ahora cuando varias docenas de ellas han entrado en la fase de ensayo clínico. Estas vacunas se basan en ADN o ARN que codifica las proteínas deseadas. Tras su inoculación, los genes penetran en las células, que entonces producen las proteínas en cuestión.

En comparación con la obtención de proteínas, producir el material genético debería ser más simple y económico. Además, una sola vacuna puede incluir las secuencias que codifican múltiples proteínas, y también puede modificarse con facilidad si un patógeno muta o si se necesitan propiedades adicionales. Por ejemplo, los expertos en salud pública actualizan cada año la vacuna contra la gripe, pero en ocasiones esta no se corresponde con las cepas que circulan cuando llega la temporada de la enfermedad. En el futuro, los investigadores podrían secuenciar el genoma de las cepas circulantes y fabricar en pocas semanas una vacuna adecuada.

La genómica proporciona además un nuevo enfoque sobre un tipo de vacunación conocida como «transferencia de inmunidad pasiva», en la que en lugar de antígenos se administran anticuerpos. Ello permite identificar personas resistentes a cierto patógeno, aislar los anticuerpos que otorgan esa protección y diseñar una secuencia genética que induzca a las células a producirlos.

Empresas y laboratorios académicos tratan de poner en marcha la técnica. Para ello se están llevando a cabo numerosos ensayos clínicos para evaluar la seguridad y la inmunogenicidad de vacunas contra la gripe aviar, el ébola, la hepatitis C, el VIH y cánceres de mama, pulmón, próstata y páncreas, entre otros. Y al menos uno de ellos ya está analizando la eficacia de la técnica: en EE.UU., los Institutos Nacionales de la Salud han puesto en marcha un ensayo clínico para determinar si una vacuna de ADN resulta exitosa contra el zika.

Entretanto, los investigadores buscan formas más eficientes de introducir los genes en las células o de aumentar la estabilidad de las vacunas frente al calor. Su administración por vía oral, muy útil para cuando escaseara el personal médico, no parece factible en el futuro cercano, pero se está estudiando la vía nasal como alternativa. Hay un elevado optimismo de que cualquier obstáculo restante podrá resolverse.

corrientes y baratos, como el níquel o el cobre; o renunciar por completo a los metales. Además, dado que los catalizadores comerciales suelen consistir en capas de nanopartículas de platino depositadas sobre una película de carbono, también se están ensayando sustratos alternativos.

Stanislaus S. Wong, de Stony Brook, que trabaja en colaboración con Radoslav R. Adzic, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, se encuentra entre quienes encabezan la ofensiva. Su grupo ha combinado cantidades relativamente exiguas de platino o paladio con metales como hierro, níquel o cobre, a fin de producir catalizadores mucho más eficientes que los actuales. El grupo de Wong los ha creado en forma de nanohilos que, con un diámetro aproximado de dos nanómetros, presentan una superficie muy elevada con relación a su volumen, lo que aumenta el número de zonas activas para la catálisis.

Por supuesto, lo ideal sería disponer de catalizadores sin platino. Los estudios al respecto, aunque recientes, parecen bullir. A finales de 2016, Sang Hoon Joo, del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología de Ulsan, en Corea del Sur, refirió que un catalizador de nanotubos de carbono dopado con hierro y nitrógeno presentaba una actividad equiparable a la de los catalizadores comerciales. Por su parte, Liming Dai y su equipo, de la Universidad Case Western Reserve, han diseñado uno que no necesita metales. Consta de una espuma de carbón dopada con nitrógeno y fósforo que resulta tan activa como los catalizadores estándar.

Con todo, Wong señala que encontrar un material con una actividad catalítica notable constituye solo una parte del desafío. Otro reto pasa por aumentar la escala de producción. En todas las fases del proyecto participan teóricos que aplican complejos modelos informáticos para averiguar cómo afectan al rendimiento todo tipo de variables, desde la composición química, el tamaño y la forma de las nanopartículas metálicas hasta la arquitectura de las estructuras de soporte. Wong apunta que, algún día, todo ello debería materializarse en vehículos asequibles.

Por supuesto, un sistema de transporte sostenible exige no solo cero emisiones durante la conducción, sino también en el proceso de producción y distribución de la electricidad o el hidrógeno. Este es el gran reto que aún persiste.




ENERGÍA

# COMUNIDADES SOSTENIBLES

## EL REDISEÑO ECOLÓGICO DE VECINDARIOS ENTEROS AHORRARÁ ENERGÍA, AGUA Y EMISIONES

***Daniel M. Kammen***



**En los últimos diez años,** el acondicionamiento de viviendas para reducir el consumo de energía y agua ha crecido de forma vertiginosa. Sin embargo, aplicar la misma idea a vecindarios enteros sería aún mejor. Compartir recursos e infraestructuras disminuiría los residuos, y modernizar los barrios empobrecidos o de ingresos moderados ahorraría costes y acercaría la tecnología a quienes normalmente carecen de ella. Trabajar a la escala de un vecindario puede resultar complejo, pero permitiría obtener recompensas que las viviendas ecológicas unifamiliares no pueden ofrecer.

Un ejemplo es el proyecto EcoBlock de Oakland, que dirijo en la Universidad de California en Berkeley junto con Harrison Fraker, profesor de arquitectura y urbanismo. Se trata de un esfuerzo multidisciplinar en el que participan urbanistas, ingenieros y sociólogos, así como expertos de los Gobiernos municipal, estatal y federal, el mundo académico, la industria, organizaciones sin ánimo de lucro y movimientos de base.

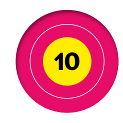
Aunque todavía no se ha iniciado la construcción, el programa reformará entre 30 y 40 casas antiguas en un barrio de ingresos bajos y medios cerca de Oakland, California. Con tecnología ya existente, el objetivo consistirá en reducir de forma drástica el consumo de agua, combustibles fósiles y las emisiones. Esperamos recuperar con rapidez el dinero invertido en infraestructura gracias al ahorro en los costes de operación, garantizando al mismo tiempo la seguridad y comodidad de los residentes.

Para suministrar energía renovable, instalaremos paneles solares en los edificios de toda la zona y la enviaremos a una microrred inteligente. El exceso de energía solar se almacenará mediante un sistema basado en volantes de inercia alojado en un edificio comunal. Los residentes compartirán vehículos eléctricos, los cuales tendrán acceso a más de dos docenas de estaciones locales de recarga. Estas medidas deberían reducir a la mitad el consumo anual de electricidad y eliminar las emisiones de carbono, lo que, considerando que más de la cuarta parte de las emisiones de EE.UU provienen de las viviendas, constituiría toda una hazaña.

La Agencia de Protección Ambiental calcula que el 50 por ciento del agua que se consume en los hogares de California se destina a regar céspedes y jardines. A tal fin, se tratarán y reutilizarán las aguas residuales de los inodoros, así como las aguas grises de las lavadoras y las vertidas por los desagües. Se recolectará el agua de lluvia, que irá a inodoros y lavadoras, e instalaremos grifos y accesorios eficientes. Por otro lado, los residuos sólidos tratados se utilizarán para elaborar compost. Nuestros cálculos indican que este rediseño sistémico disminuirá la demanda de agua potable hasta en un 70 por ciento.

El proyecto EcoBlock de Oakland creará empleos en construcción y ayudará a revitalizar la comunidad. Si tiene tanto éxito como predecimos, podría servir como modelo y reproducirse en otros lugares del mundo. Hasta la fecha, hemos recibido consultas de Europa, África del Norte y Asia, lo que confirma que existe un gran interés por rediseñar comunidades enteras y no solo viviendas individuales.






COMPUTACIÓN

# AVANCES EN COMPUTACIÓN CUÁNTICA

## LOS ÚLTIMOS DESARROLLOS ABREN LA PUERTA A NUEVAS APLICACIONES

*Darío Gil*

**La computación cuántica** ha espoleado la imaginación humana durante casi 50 años. La razón es simple: promete resolver problemas para los que una máquina clásica jamás tendría respuesta. Los ejemplos incluyen simulaciones químicas exactas de nuevas moléculas y materiales, así como varios problemas complejos de optimización, en los que se busca la mejor solución entre un gran número de alternativas. Todas las industrias necesitan optimizar, lo cual constituye una de las razones por las que esta técnica presenta un potencial tan disruptivo.

En lugar de considerar de una en una cada posible solución a un problema, un ordenador cuántico opera de un modo imposible de explicar con analogías clásicas. Comienza con una superposición cuántica de todas las posibilidades y, mediante los fenómenos intrínsecamente cuánticos de entrelazamiento e interferencia, da con la respuesta correcta.

Hoy podemos poner a prueba técnicas y algoritmos que hasta hace poco eran estrictamente teóricos

El precio es la dificultad para construir los equipos. Uno de los diseños posibles requiere materiales superconductores que deben mantenerse a temperaturas inferiores a la del espacio exterior, un exquisito control sobre los estados cuánticos y un blindaje que impida que ni un solo rayo de luz alcance el procesador. Hasta hace poco, el acceso a ordenadores cuánticos rudimentarios estaba restringido a unas pocas instalaciones en todo el mundo. Sin embargo, los progresos efectuados en los últimos años han permitido la construcción de los primeros prototipos que, finalmente, pueden poner a prueba ideas, técnicas y algoritmos que hasta hace poco eran estrictamente teóricos.

Las máquinas existentes son aún demasiado pequeñas para resolver problemas más complejos que aquellos que pueden tratarse con los superordenadores actuales. Sin embargo, se han logrado importantes avances. Se han desarrollado algoritmos que se ejecutarán más rápido en una máquina cuántica. Existen técnicas que, en bits cuánticos superconductores, prolongan la coherencia (la duración de la información cuántica) hasta 100 veces más que hace 10 años. También podemos medir los tipos más importantes de errores cuánticos. Y, en 2016, IBM concedió acceso público al primer ordenador cuántico en la nube (IBM Q Experience), con una interfaz gráfica para programarlo y ahora basada en el popular lenguaje Python. La apertura de este sistema ha estimulado innovaciones que resultan vitales para el progreso de la técnica y ha dado lugar a más de 20 artículos en los que se emplea esta herramienta. El campo se está expandiendo de forma espectacular: grupos de investigación del ámbito académico y más de 50 empresas emergentes y grandes corporaciones están centrados en conseguir que la computación cuántica se convierta en una realidad.

Con tales avances y con una máquina al alcance de cualquier persona, ha llegado el momento de prepararse para la informática cuántica. La gente ha comenzado a atisbar qué haríamos si existiesen máquinas capaces de resolver problemas complejos, y en Internet ya existen numerosas guías para iniciarse.

Aún quedan muchos obstáculos. Los tiempos de coherencia han de mejorarse y las tasas de error deben reducirse. Los investigadores continuarán innovando tanto los soportes físicos como los aspectos de programación. Con todo, no hay acuerdo sobre qué criterios deberían determinar el momento en que la computación cuántica haya alcanzado la madurez tecnológica. Algunos han propuesto un estándar definido por la capacidad para realizar una medición científica tan oscura que no pueda explicarse a un público general. Otros disentimos, argumentando que la computación cuántica habrá emergido verdaderamente cuando logre resolver problemas que tengan importancia comercial, intelectual y social. La buena noticia es que, finalmente, ese día se halla a la vista.


**PARA SABER MÁS**

**The top 10 emerging technologies of 2016.** *Scientific American* y Foro Económico Mundial, 23 de junio de 2016. **www.scientificamerican.com/report/the-top-10-emerging-technologies-of-2016**

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Hojas artificiales.** Antonio Regalado en *IyC*, diciembre de 2010.
**Hidrógeno: ¿una energía limpia para el futuro?** Vincent Artero et al. en *IyC*, octubre de 2012.
**Un rompecabezas global.** Michael Webber en *IyC*, febrero de 2015.
**Computación cuántica modular.** Christopher R. Monroe et al. en *IyC*, julio de 2016.
**Aprendizaje profundo.** Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.
**Urbanismo sostenible.** William McDonough en *IyC*, octubre de 2017.





MEDICINA TROPICAL

# LA ENFERMEDAD DE CHAGAS, UN RETO GLOBAL

Aunque endémica de América Latina, la dolencia ha llegado a Europa y otras partes del mundo. Ponerle freno exige mejorar el diagnóstico de las personas afectadas y favorecer su acceso al tratamiento

*Joaquim Gascon, Faustino Torrico y María Jesús Pinazo*

LA TRANSMISIÓN CONGÉNITA, de madres a hijos, es una importante vía de propagación de la enfermedad de Chagas en países endémicos como Bolivia. Los niños que reciben un diagnóstico precoz suelen responder bien al tratamiento.

**Joaquim Gascon,** especialista en medicina interna, microbiología médica y medicina tropical, es jefe del Servicio de Salud Internacional del Hospital Clínico de Barcelona y director de la Iniciativa de Chagas, del Instituto de Salud Global (ISGlobal).

**Faustino Torrico** es profesor de enfermedades parasitarias e infecciosas y de medicina tropical en la Facultad de Medicina de la Universidad Mayor de San Simón, en Cochabamba. También coordina programas internacionales de cooperación, investigación y atención médica.

**María Jesús Pinazo** es especialista en medicina interna y enfermedades infecciosas en el Servicio de Salud Internacional del Hospital Clínico de Barcelona e investigadora del ISGlobal. Desde 2010, coordina la Plataforma de Atención Integral a los Pacientes con Enfermedad de Chagas en Bolivia.

Recientemente conocimos el caso de Mayerlin, una niña de siete años que no debería haber contraído el chagas. Mayerlin vive en el sur de Bolivia, una zona de alta prevalencia de la enfermedad. Un 60 por ciento de la población se halla amenazada por la picadura de un insecto hematófago, *Triatoma infestans*, que allí llaman vinchuca. La amenaza en sí reside en el parásito que transmite dicho insecto cuando pica a las personas. Se trata de *Trypanosoma cruzi,* un organismo unicelular que cada año provoca la infección de Chagas a unas 39.000 personas en todo el mundo. Ellas, igual que Mayerlin, tampoco deberían haber contraído una dolencia que, con unas medidas adecuadas, podían haber evitado.

La vinchuca es traicionera porque se esconde entre las grietas de las paredes de adobe u otros materiales que se emplean en las construcciones precarias de la región. Pica a sus víctimas cuando estas duermen y defeca cerca de la picadura. A diferencia de lo que ocurre en otras enfermedades, el parásito no se halla en las glándulas salivales del insecto, sino en sus heces. Penetra en el organismo humano a través de las mucosas o de pequeñas discontinuidades en la piel (como diminutas heridas). Desde ese lugar, invade a las células de los tejidos contiguos e inicia una parte importante de su ciclo biológico.

Mayerlin no habría contraído la infección si los programas de control vectorial, encargados de fumigar las viviendas periódicamente para eliminar las vinchucas, hubiesen funcionado. Según los padres de Mayerlin, hacía más de dos años que no se fumigaba en la casa. Cuando la madre se puso a buscar vinchucas en las paredes, no tardó ni cinco minutos en encontrar una. No en vano, ha sido el control vectorial el que en los últimos años ha permitido avanzar más y reducir de forma drástica el número de infecciones nuevas.

La enfermedad de Chagas, que afecta a más de 6 millones de personas y mata a 7000 cada año en todo el mundo, es endémica en América Latina. Sin embargo, debido a los flujos migratorios, la dolencia puede propagarse a otras regiones. De ahí que el número de casos en zonas no endémicas haya ido en aumento en los últimos decenios. Para frenarla se necesita una respuesta coordinada de los sistemas sanitarios de numerosos países. No es de extrañar, pues, que su control se halle entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Tampoco lo es que, entre las 18 enfermedades que la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica como enfermedades tropicales desatendidas, la de Chagas sea una de las que exige más esfuerzos para cumplir con los compromisos de la Declaración de Londres, de 2012, con vistas al control y eliminación en 2020 de dichas enfermedades.

Para acabar con el chagas, o mantenerlo bajo control, se necesitan varias estrategias fundamentales: la eliminación o control del vector (el insecto transmisor), la supervisión de los bancos de sangre y de los programas de trasplante, y la prevención de la transmisión congénita (de madres a hijos), así como el diagnóstico y tratamiento de las personas afectadas.

Con el fin de hacer frente a la enfermedad en todo el mundo, seis instituciones internacionales (la Fundación Ciencia y Estu-

EN SÍNTESIS

**El chagas** es una enfermedad tropical que afecta a más de 6 millones de personas y provoca 7000 muertes cada año en todo el mundo. Aunque es endémica de América Latina, debido a los movimientos migratorios se han registrado numerosos casos en Europa, en especial en España.

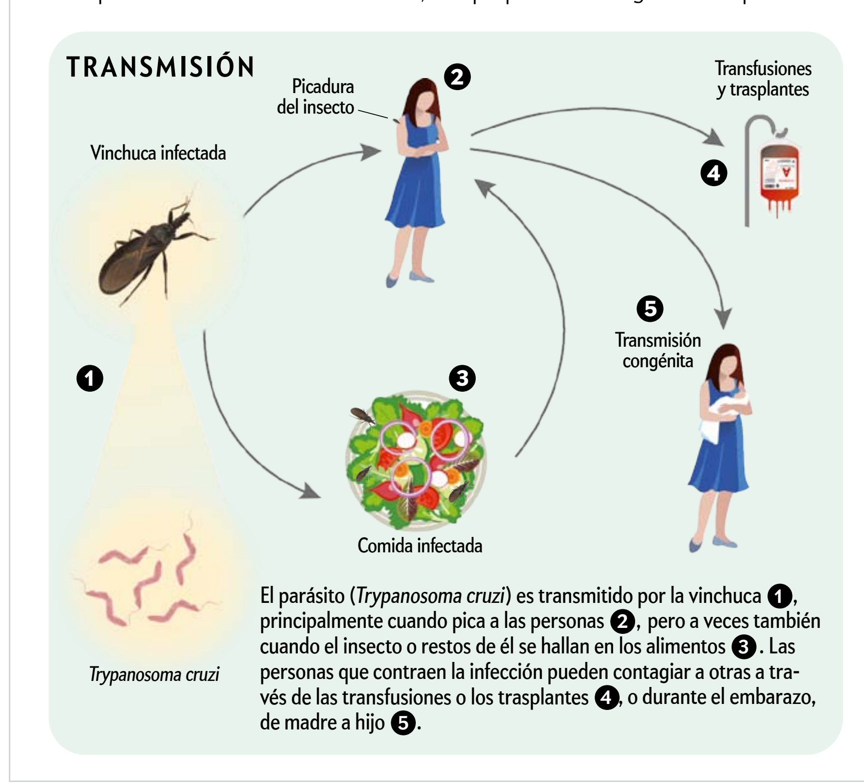
**La mayoría de las veces** causa síntomas que pasan inadvertidos, por lo que muy pocos pacientes reciben tratamiento y su enfermedad se vuelve crónica o les causa la muerte.

**El Chagas** exige una respuesta a escala mundial, con la coordinación de los sistemas sanitarios de diferentes países, que conlleve una mejora de la prevención, el diagnóstico y el acceso al tratamiento, sobre todo en las zonas endémicas.

INFECCIÓN Y SÍNTOMAS

# Así se transmite y desarrolla el chagas

**El responsable de la enfermedad** es un parásito unicelular que en las zonas endémicas es transmitido principalmente por un insecto hematófago, la vinchuca, aunque también puede propagarse por otras vías. La infección atraviesa dos fases: una aguda, de corta duración; y otra crónica, que puede manifestarse varios años o decenios más tarde y prolongarse otros más. Una buena parte de los afectados no presentan síntomas en toda la vida, aunque pueden contagiar a otras personas.




El parásito (*Trypanosoma cruzi*) es transmitido por la vinchuca 1, principalmente cuando pica a las personas 2, pero a veces también cuando el insecto o restos de él se hallan en los alimentos 3. Las personas que contraen la infección pueden contagiar a otras a través de las transfusiones o los trasplantes 4, o durante el embarazo, de madre a hijo 5.

**EVOLUCIÓN**

**FASE AGUDA**
(dos meses)
Cuadro febril pasajero; en pocos casos, complicaciones graves y muerte

**FASE CRÓNICA**
(entre 20 y 30 años)

Complicaciones cardíacas entre el 25 y el 30 %

Complicaciones digestivas entre el 10 y el 20 % de los infectados

Trastornos neurológicos menos del 5 %

Sin síntomas: El 60 %

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

dios Aplicados para el Desarrollo en Salud y Medio Ambiente, o CEADES; el Instituto de Salud Global, o ISGlobal, integrado en el Hospital Clínico de Barcelona; la Fundación Mundo Sano; la Iniciativa Medicamentos para Enfermedades Olvidadas, o DNDi; la Escuela de Medicina de Baylor; y el Hospital Pediátrico de Texas), a las que después se unieron otras, crearon la Coalición Global de Chagas. Sus objetivos principales son fortalecer el intercambio de conocimiento, sensibilizar a la población sobre la enfermedad y ejercer una mayor presión política para introducir cambios en los sistemas sociales. Desde esta alianza sin precedentes en la historia del chagas, hemos elaborado varias propuestas para mejorar la prevención y hemos insistido en que el diagnóstico y el tratamiento de las personas con la infección se realicen lo antes posible. Los datos cosechados por la Coalición indican que tales estrategias han mejorado la situación del chagas en el mundo, aunque todavía queda mucho camino por recorrer.

## PREVENIR LA ENFERMEDAD

Los efectos de las fumigaciones realizadas para controlar el insecto vector en los países endémicos son llamativos: el número de personas con la infección pasó de 30 millones, en 1990, a alrededor de 6 millones en 2015. Gracias a esas medidas preventivas, el número de muertes anuales también se redujo de forma notable: de 45.000, en la década de los ochenta, a 7000 en la actualidad (la mayoría de ellas por no haberse podido diagnosticar y tratar a tiempo). Los buenos resultados alcanzados han llevado a que la OMS otorgara un certificado de interrupción de la transmisión vectorial a varias zonas.

La propagación también se ha frenado gracias a la supervisión de los bancos de sangre destinada a la transfusión. Casi la totalidad de los productos sanguíneos procedentes de los bancos está controlado y ello se ha traducido en una reducción del número de nuevas infecciones.

En la actualidad, resulta fundamental evitar otras formas de transmisión, sobre todo la congénita, en la que el patógeno se contagia de madre a hijo durante el embarazo o el parto. En efecto, con una tasa de transmisión congénita de entre el 2 y el 7 por ciento, se estima que cada año nacen unos 9000 niños con la infección por *T. cruzi*, por lo que se requieren renovados esfuerzos para eliminar esta vía de transmisión. Existen dos posibles estrategias para lograrlo. Una consiste en el tratamiento de las mujeres en edad fértil afectadas de las zonas endémicas, pues algunos estudios recientes han demostrado que los recién nacidos de las mujeres previamente tratadas tienen un riesgo 21 veces inferior de haber adquirido la infección que los de las mujeres no tratadas. Por otro lado, se puede actuar directamente en el momento del parto para detectar si el bebé se ha contagiado, realizar un seguimiento durante los primeros meses de vida para confirmar el diagnóstico y, en caso necesario, iniciar pronto el tratamiento.

Desde los años noventa del pasado siglo, se han hecho esfuerzos para reducir al mínimo la transmisión congénita. Entre ellos destacan los del Programa Nacional de Argentina, con buenos indicadores de cobertura de mujeres embarazadas, aunque no de seguimiento de los recién nacidos que dan positivo al patógeno.

Desafortunadamente, no existen en todos los países afectados programas sistemáticos de control y con una continuidad prolongada. Las estimaciones de la OMS aún hablan de 70 millones de personas con riesgo de contraer la enfermedad, lo que plantea un desafío de salud pública global.

### EL DIAGNÓSTICO PRECOZ, UNA PRIORIDAD

Una vez el parásito *T. cruzi* ha penetrado en el organismo humano, se inicia la fase aguda de la enfermedad. Esta suele ser asintomática o generar un cuadro febril pasajero, aunque entre un 5 y un 10 por ciento de los afectados desarrollan formas más graves, con meningoencefalitis o carditis. En la mayor parte de los pacientes que todavía no han recibido tratamiento, el sistema inmunitario logra controlar la infección y reducir el número de parásitos en esta etapa.

Al cabo de dos o cuatro meses, comienza la fase crónica. En ella, la mayoría de las personas no muestran signos de la enfermedad, pero a lo largo de su vida, entre un 30 y un 40 por ciento de los afectados presentarán alguna de las complicaciones cardíacas, digestivas o neurológicas asociadas al chagas. Tales trastornos son de lenta instauración, por lo que pueden transcurrir décadas entre el momento de la infección y la manifestación clínica de la enfermedad.

La mortalidad se produce, principalmente, bien entre los casos graves durante la fase aguda, o bien entre las personas con complicaciones cardíacas o neurológicas durante la fase crónica.

Existen en la actualidad varias pruebas serológicas y también de biología molecular (consistente en la detección del ADN del parásito) que facilitan el diagnóstico de la enfermedad. Sin embargo, se necesitan técnicas complejas para practicarlas, por lo que su aplicación en las zonas rurales de los países endémicos resulta difícil.

El criterio de la OMS dicta que se necesitan dos pruebas serológicas positivas para confirmar el diagnóstico. Con estas pruebas, basadas en técnicas y antígenos diferentes, se detectan anticuerpos específicos contra el parásito generados por el sistema inmunitario del paciente. Las pruebas parasitológicas directas, en las que se visualiza la presencia del parásito en la sangre, únicamente pueden utilizarse en la fase aguda, ya que en la fase crónica el parásito se sitúa principalmente en los tejidos profundos, y solo se halla en la sangre periférica de forma intermitente y escasa.

### FACILITAR EL TRATAMIENTO

No valen las excusas a la hora de hacer frente al desafío de mejorar la inaceptable tasa de acceso que tienen los pacientes de chagas al tratamiento a escala mundial. Apenas un 1 por ciento de ellos lo recibe. Lograr la total cobertura de los afectados exige aumentar la intensidad de todos los esfuerzos tanto en los países endémicos como en los no endémicos.

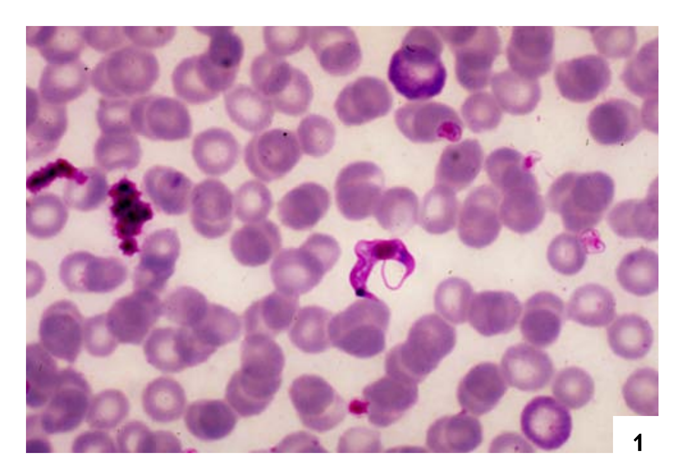
En la actualidad existen solo dos tratamientos contra la enfermedad: el benznidazol, utilizado generalmente como primera línea, y el nifurtimox, como segunda. Debido a la ausencia de investigaciones que hayan dado lugar a nuevas opciones terapéuticas, son los mismos fármacos que se emplean desde los años setenta del pasado siglo. Pero, si bien el tratamiento es de larga duración (dos meses con benznidazol y tres con nifurtimox) y puede generar efectos adversos que en ocasiones obligan a detenerlo, resulta bastante efectivo, sobre todo en niños y jóvenes.

No obstante, todavía resulta difícil comprobar de forma precoz si los pacientes han respondido al tratamiento. Las pruebas




EL CHAGAS afecta a más de 6 millones de personas en el mundo. La mayoría de ellas se concentra en los países de Latinoamérica, pero, debido a los movimientos migratorios, la enfermedad se ha propagado a otras regiones no endémicas. Los círculos rojos señalan los países donde hay personas infectadas (datos de 2016). Se especifica el número de ellas cuando superan 150.000, y también para España y Europa.

FUENTE: COALICIÓN GLOBAL DE CHAGAS, EN BASE A DATOS DE OMS


1


2


3

LA ENFERMEDAD DE CHAGAS está provocada por una infección en la sangre del parásito *Trypanosoma cruzi* (*1*). Se transmite a través de la picadura de la vinchuca (*Triatoma infestans*) (*2*), un insecto hematófago que en las zonas endémicas se refugia en lugares oscuros, como las grietas de construcciones de adobe o debajo de los colchones (*3*).

CDC/DR. MAE MELVIN (1); ISAIAS MONTILLA/OMS (2); FERNANDO G. REVILLA/OMS (3)

serológicas que nos permiten diagnosticar el chagas tardan años en dar negativo después del tratamiento. Como ocurre en muchas otras enfermedades infecciosas crónicas, la serología se mantiene positiva durante un largo tiempo después de haber finalizado el tratamiento y de haberse producido una probable cura. Este efecto se debe a la memoria inmunitaria, el recuerdo que mantiene el sistema inmunitario respecto a la infección. De ahí que una de las líneas de investigación más necesarias sea la que se centra en hallar biomarcadores tempranos de la respuesta terapéutica. Urge desarrollar herramientas que permitan confirmar la curación de forma precoz, identificar signos de progresión de la enfermedad y detectar aquellas personas con más riesgo de desarrollo de lesiones orgánicas.

Durante años, se había considerado que el tratamiento resultaba muy poco eficaz en la población adulta, con una curación del 20 por ciento de los pacientes. Pero los datos más recientes indican que ese porcentaje es superior. Así, diversos estudios han utilizado pruebas de biología molecular de forma continuada y han demostrado que en el 80 por ciento de los pacientes tratados con benznidazol no se observa el parásito en su sangre periférica al cabo de 12 meses. Otros trabajos han revelado que las personas tratadas a las que se ha hecho un seguimiento durante más de diez años muestran valores muy bajos o indetectables en las pruebas serológicas; además, han sufrido menos complicaciones cardíacas que las personas no tratadas.

Sin embargo, el tratamiento contra el parásito no es útil para reparar las lesiones estructurales de los tejidos dañados, que se observan en las fases avanzadas de la enfermedad. De ahí la importancia de que tanto el diagnóstico como el tratamiento se lleven a cabo de forma precoz. Ello es de especial relevancia en las mujeres en edad de procrear, como se ha comentado antes.

Aparte de contar con los dos fármacos señalados para tratar la enfermedad, se están explorando otras posibilidades. Hay una serie de estudios en marcha que tienen por objetivo buscar nuevos medicamentos que mejoren la seguridad y la eficacia del tratamiento, y también se están analizando nuevos esquemas terapéuticos con los fármacos de los que disponemos actualmente (benznidazol y nifurtimox).

Con la cobertura de tratamiento que existe hoy en los países endémicos, tardaríamos 300 años en atender a todos los pacientes, un tiempo totalmente inaceptable. Las razones por las que los tratamientos actuales no llegan a sus destinatarios guardan relación con ciertas dificultades de accesibilidad, sobre todo por la lejanía entre algunas comunidades de afectados y los centros sanitarios. A ello también contribuyen el desconocimiento o miedo de los pacientes acerca de los efectos adversos, los estigmas sociales relacionados con la enfermedad o la falta de voluntad política en dedicar más atención y recursos a una enfermedad tradicionalmente asociada a la pobreza.

### UNA CUESTIÓN ÉTICA, PERO TAMBIÉN RENTABLE

El tratamiento de los pacientes de chagas no debería estar sujeto a discusión, desde un punto de vista ético. No existe excusa alguna en este sentido, como señala el mandato de los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. El tratamiento no solo cura y salva vidas, sino que contribuye al control y prevención de la propia enfermedad, una cuestión de salud pública. En un contexto en el que cada año se producen alrededor de decenas de miles de nuevos casos en todo el mundo debido a la transmisión vectorial y a la transmisión congénita, el tratamiento se convierte en una fuente eficaz de prevención, puesto que ayuda a interrumpir la cadena de transmisión, uno de los grandes retos a los que se enfrentan los profesionales y las instituciones afectadas.

# Avances contra el chagas en un país endémico y en uno no endémico

## EN BOLIVIA

**Con un 60 por ciento** de su territorio considerado área endémica de chagas y más de 600.000 personas con la infección, es el país del mundo con la mayor prevalencia de la enfermedad, estimada en el 6,1 por ciento. En 2009, ISGlobal y la Fundación CEADES, con la participación de los autores de este artículo, crearon la Plataforma de Atención Integral a los Pacientes con Enfermedad de Chagas, con el objetivo de dar cobertura al diagnóstico y tratamiento de personas en edad adulta, ofrecer formación a los profesionales de la salud sobre el manejo de la enfermedad y llevar a cabo proyectos de investigación y desarrollo (entre ellos, ensayos clínicos con nuevos fármacos o la mejora de técnicas diagnósticas aplicables a zonas rurales).

Actualmente, la Plataforma se compone de seis centros de atención en tres departamentos de Bolivia (Cochabamba, Chuquisaca y Tarija). Durante cuatro años se ha consolidado un modelo protocolizado de atención en las diferentes áreas de actuación, que actualmente se está extendiendo a los centros del Sistema Nacional de Salud (SNS) de Bolivia. Más de 1.600 profesionales de la salud del país han recibido formación para el manejo de pacientes con chagas, y se ha establecido un programa de intercambio entre la Universidad Mayor de San Simón (Bolivia) y la Universidad de Barcelona para compartir los resultados del proyecto.

Hasta diciembre de 2015, se había atendido en los centros de la Plataforma a más de 24.700 pacientes, de los cuales 21.387 fueron diagnosticados de infección por *T. cruzi* y 10.454 iniciaron tratamiento. Más del 80 por ciento ya lo han finalizado. Hace poco publicamos los primeros resultados del proyecto en la revista *PLOS Neglected Tropical Diseases*.

La clave del éxito ha sido compartir en ambos países una misma base de datos, así como aplicar un protocolo estándar en todos los centros para la atención de los pacientes. Además, el carácter transnacional de la alianza ISGlobal-CEADES permite hacer seguimiento de pacientes y familiares que se mueven entre España y sus lugares de origen en Bolivia. Sin embargo, a pesar de estas cifras alentadoras, aún queda mucho por hacer para aumentar el acceso al diagnóstico y al tratamiento de la enfermedad en el país.

## EN EE.UU.

**Unas 300.000 personas** padecen chagas en este país considerado no endémico. A pesar de la presencia del insecto vector en algunas zonas, la infección a causa de su picadura en este territorio es poco común. La gran mayoría de los pacientes son inmigrantes procedentes de países endémicos o hijos nacidos de madres de esas zonas. El Centro de Excelencia para la enfermedad de Chagas en el Centro Médico Olive View, de la Universidad de California en Los Ángeles, abrió en 2007 una clínica en el condado de Los Ángeles para el diagnóstico y tratamiento de la enfermedad, el primer centro en los EE.UU. que se dedica a ese fin. Desde entonces, entre la clínica y las actividades de extensión comunitaria, se han realizado pruebas diagnósticas a 7357 personas, de las cuales 200 han dado positivo a la infección y 162 de ellas han recibido tratamiento. Además, el centro lleva a cabo diferentes estudios sobre la enfermedad en EE.UU. En ellos se analiza la prevalencia de la infección en mujeres embarazadas y de la transmisión congénita, entre otros aspectos.

Además, desde un punto de vista económico, tratar el chagas resulta rentable. Los estudios que analizan, en términos de gasto, el impacto de las enfermedades en la productividad de las personas afectadas nos ayudan a entenderlo y ofrecen una herramienta muy útil a las autoridades políticas y administrativas del mundo sanitario.

El chagas es la enfermedad parasitaria que provoca mayor mortalidad en América Latina, y es la primera enfermedad tropical y la cuarta infecciosa con más carga medida en años de vida perdidos. El parámetro AVAD, los años de vida ajustados por discapacidad, refleja ese lastre: se ha estimado que el chagas acarrea una pérdida total anual de 806.170 AVAD en todo el mundo.

Se calcula que la carga financiera total del chagas, para el conjunto de los pacientes, principalmente debido a la disminución de la productividad laboral, es de unos 7200 millones de dólares anuales en todo el mundo, una cantidad equivalente a toda la ayuda que destinan los cinco principales donantes europeos al sector de la salud.

Recientemente, nuestro equipo de ISGlobal y el Hospital Clínico de Barcelona, publicó un estudio en *The Lancet Global Health* sobre la rentabilidad económica que supone para el sistema sanitario realizar un examen sistemático, o cribado, de los adultos de origen latinoamericano que viven en Europa con el fin de detectar si sufren la infección. Con anterioridad, los dos mismos autores habíamos participado en un cribado similar realizado en mujeres embarazadas y sus hijos y habíamos obtenido resultados similares, que se publicaron en *Acta Tropica*. Precisamente estos últimos datos sirvieron para que el Departamento de Salud de la Generalitat de Cataluña implementara un programa pionero en Europa de cribado de la enfermedad de Chagas en mujeres embarazadas de origen latinoamericano.

Ninguno de los costes humanos, institucionales y económicos mencionados resulta inevitable. Así lo demuestran varios estudios de casos realizados en Bolivia, Argentina y Estados Unidos publicados en 2016 por la Coalición Global de Chagas en el informe *Rompiendo el silencio, una oportunidad para los pacientes de chagas*.

### ESPAÑA, PIONERA EN LA ATENCIÓN

Como consecuencia de los flujos migratorios, el chagas ha dejado de ser un problema exclusivo de Latinoamérica y la enfermedad se halla también presente en zonas no endémicas como Europa, EE.UU., Japón o Australia. Tan solo en EE.UU. se estima que viven alrededor de 300.000 personas con la infección.

La inmigración originaria de América Latina empieza a dirigirse hacia Europa a partir de los años setenta y se incrementa de forma notable a finales del siglo xx. Con una cifra estimada

de entre 48.000 y 87.000 afectados, España es el país europeo donde vive un mayor número de personas con chagas.

Los primeros artículos científicos que hacen referencia a la enfermedad importada en España se publicaron entre 2006 y 2008. En 2010 se advirtió por primera vez, durante la 63.ª Asamblea Mundial de la Salud de la OMS, acerca del aumento de los casos de chagas en países no endémicos, y se reconoció la necesidad de trabajar para controlar todas las vías de transmisión de la enfermedad.

En España y Europa se han detectado casos de transmisión no vectorial (no transmitida por el insecto) que se han asociado a transfusiones sanguíneas, trasplantes de órganos o la transmisión congénita (de madres a hijos). Por lo tanto, los retos que deben afrontar los países no endémicos para combatir la enfermedad son similares a los de los países endémicos, con excepción del control del insecto vector. Mención aparte merecen los Estados Unidos, donde sí se han descrito unos pocos casos de transmisión vectorial autóctona en algunos estados.

Se calcula que apenas el 10 por ciento de las personas que viven en Europa con la infección de *T. cruzi* han sido diagnosticadas. España es uno de los países no endémicos que ha tenido mayor experiencia en el manejo de pacientes de chagas, y donde se han elaborado un mayor número de guías clínicas y se han implementado programas de control de la transmisión congénita.

En la actualidad, más de 145 hospitales españoles tratan la enfermedad. Nuestro sistema de sanidad ha provisto tratamiento (benznidazol y nifurtimox) al 10 por ciento de los afectados que hay en el país, mientras que en el resto del mundo la cifra apenas alcanza el 1 por ciento. Hasta mayo de 2016, habían sido tratadas más de 4000 personas en España.

Sin embargo, solo cuatro comunidades autónomas disponen de protocolos oficiales para el control de la transmisión congénita. En el resto de Europa, únicamente la región italiana de la Toscana aplica un programa similar.

## LAS RESPUESTAS

Entre 2003 y 2013, el dinero invertido en I+D para la enfermedad de Chagas en todo el mundo alcanzó 161,5 millones de dólares, una cifra insuficiente. El importe tan solo representa el 1 por ciento del total invertido en enfermedades desatendidas. Uno de los objetivos de la Coalición Global de Chagas es precisamente lograr un incremento de los recursos I+D destinados a esta enfermedad, en especial en Latinoamérica.

Deben mantenerse o intensificarse los esfuerzos para evitar la transmisión congénita del parásito, mediante el cribado universal de mujeres en edad fértil, así como de los bancos de sangre y de los órganos para donación. También se necesita poner freno al insecto vector. Si los programas de control vectorial no se sostienen en el tiempo, si no llegan incluso a las zonas más alejadas, muchísimas personas, como Mayerlin, contraerán la infección.

Otro de los objetivos de la Coalición es aumentar el acceso al tratamiento, que hoy alcanza solo al 1 por ciento de los pacientes. Para el 2020 aspira a lograr el diagnóstico y el tratamiento de todos los recién nacidos y los menores de 18 años con la infección, así como a multiplicar por diez el número de los adultos tratados.

La Coalición ha elaborado algunas propuestas para conseguirlo. Entre ellas destacan la atención integral a la enfermedad de Chagas en la oferta de prestación de servicios de salud; la formación continuada del personal de salud, a los que no siempre alcanza el consenso médico con respecto a los tratamientos contra el chagas; la mejora de la calidad de los sistemas de información en salud, que determina aspectos tan básicos como identificar la magnitud del problema o cuantificar las necesidades farmacéuticas; y, por último, la financiación y el impulso político para aplicar los métodos más eficaces.

Para conseguir esos retos, resulta indispensable contar con el compromiso político de los Estados para desarrollar una acción global de lucha contra la enfermedad. Las estrategias coordinadas entre países endémicos y no endémicos son la respuesta más adecuada a un reto de salud mundial.

Hace cinco años, ISGlobal y el Hospital Clínico, con financiación de la Agencia Española de Cooperación Internacional, junto con la boliviana Fundación CEADES, las universidades de Tarija y Cochabamba y el Programa Nacional de Chagas del Ministerio de Salud del país andino, pusieron en marcha en Bolivia la Plataforma de Atención Integral a los Pacientes con Enfermedad de Chagas. Esta ha permitido ofrecer atención y seguimiento de los afectados bajo un protocolo coordinado e integrado que se ha incluido en el sistema sanitario de Bolivia. Además, dado el tipo de migración circular que existe en la actualidad, el proyecto contempla el seguimiento de un mismo paciente a un lado y otro del océano.

La posibilidad de eliminar el chagas de la lista de enfermedades desatendidas se halla en nuestras manos. Que se haya mantenido invisible hasta ahora no se debe solo a la tipología de la enfermedad, sino a nuestra incapacidad de ver y escuchar. Con las herramientas actuales podemos ofrecer una respuesta, pero necesitamos una mayor voluntad política y la unidad y fortalecimiento de toda la comunidad relacionada con el chagas, en la que se incluyen el personal sanitario, los pacientes, los investigadores y las diversas instituciones y organizaciones. Cuanto más coordinados trabajemos, mejor podremos hacer uso de las herramientas de diagnóstico y tratamiento de las que disponemos en la actualidad, a la espera de que encontremos mejores soluciones en el futuro. IyC

### PARA SABER MÁS


**Chagas disease in Spain, the United States and other non-endemic countries.** J. Gascon, C. Bern y M. Jesús Pinazo en *Acta Tropica*, vol. 115, n.os 1-2, págs. 22-27, julio-agosto de 2010.

**Rompiendo el silencio. Una oportunidad para los pacientes de Chagas.** Dirigido por Silvia Moriana, Gema Ortiz y Gonzalo Fanjul. Coalición Global de la Enfermedad de Chagas, abril de 2016.

**Altered hypercoagulability factors in patients with chronic Chagas disease: Potential biomarkers of therapeutic response.** M. Jesús Pinazo et al. en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 10, n.º 1, art. e0004269, 2016.

**Cost-effectiveness of Chagas disease screening in Latin American migrants at primary health-care centres in Europe: a Markov model analysis.** A. Requena Méndez et al. en *Lancet Global Health*, vol. 5, n.º 4, págs. e439-e447, 2017.

**A strategy for scaling up access to comprehensive care in adults with Chagas disease in endemic countries: The Bolivian Chagas Platform.** M. Jesús Pinazo et al. en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 11, n.º 8, art. e0005770, 2017.

Página web de la Coalición Global de Chagas: **www.coalicionchagas.org**


### EN NUESTRO ARCHIVO


**Estrategias parasitarias de los protozoos intracelulares.** Wanderley De Souza en *IyC*, mayo de 1994.

**Enfermedades tropicales olvidadas.** Peter Jay Hotez en *IyC*, marzo de 2010.

**¿Cómo prever y contener epidemias como la del zika?** Robert L. Dorit en *IyC*, diciembre de 2016.

Los científicos comienzan a dilucidar si

EN SÍNTESIS

**Para pronosticar con precisión** cuánto se calentará el planeta como resultado del cambio climático, los científicos deben determinar la influencia de las nubes.

**Los modelos por ordenador** tienen dificultades para simular la naturaleza cambiante de las nubes, pero los datos procedentes de satélites están revelando importantes indicios: probablemente las nubes altas se situarán a una altura aún mayor; las bandas nubosas y despejadas podrían desplazarse hacia los polos; y las nubes podrían perder hielo y volverse más acuosas.

**Los datos indican** que las tendencias que intensifican el calentamiento son fuertes, mientras que las que lo frenan son más débiles de lo que se pensaba.

CLIMA

# EL ENIGMA DE LAS NUBES

**los cambios en la nubosidad acelerarán o frenarán el cambio climático**

*Kate Marvel*



**Kate Marvel** es investigadora asociada del Departamento de Matemáticas y Física Aplicadas de la Universidad de Columbia y del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA.

Quienes nos dedicamos a la ciencia del clima sabemos, gracias a los datos, que la Tierra se calentará a lo largo de este siglo y más allá. Sin embargo, nos está costando precisar cuánto aumentará la temperatura: ¿otro grado más, quizá? ¿O serán dos, tres, o cuatro? La respuesta depende en muy buena medida de las nubes. El cambio climático está modificando su distribución en la atmósfera, algo que podría contribuir a que el calentamiento global se frene... o a que se acelere.

Grandes equipos de expertos han creado más de veinte modelos climáticos ricos en detalles y los han puesto a prueba cotejándolos con vastos conjuntos de datos. Sin embargo, si bien todos los modelos muestran una Tierra que se calienta como resultado de las actuales emisiones de gases de efecto invernadero, unos y otros discrepan obstinadamente en lo referente a la nubosidad. Esa situación ha comenzado a cambiar. Las simulaciones de los efectos de las nubes empiezan a coincidir. ¿Nos dan una nueva esperanza o empeoran nuestros miedos?

### RETROALIMENTACIÓN GRANDE O PEQUEÑA

Imaginemos la Tierra justo antes de la Revolución Industrial. Pese a la tala de bosques, el valor de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se ha mantenido estable en 280 partes por millón (ppm) durante miles de años. Pero entonces apareció el motor de combustión interna: a finales del siglo xx las concentraciones de $CO_2$ habían aumentado, lo que afectó a todo el sistema planetario. La troposfera, la capa que alberga el aire que respiramos, se está calentando. En 2017, la concentración de $CO_2$ rebasaba las 400 ppm. Los continentes también se están calentando, al igual que los océanos. La circulación del aire y el vapor de agua en la atmósfera está comenzando a cambiar. Si se mantiene la tendencia actual, la concentración de $CO_2$ atmosférico doblará el valor preindustrial a mitad del presente siglo, lo que acentuará el calentamiento. Finalmente, al cabo de varios centenares de años, se alcanzará un nuevo equilibrio a una temperatura mayor.

La respuesta planetaria a la duplicación de la concentración de dióxido de carbono se conoce como «sensibilidad climática de equilibrio». Todos los modelos coinciden en que su valor es superior a cero y, por tanto, cabe esperar cierto calentamiento. Según las predicciones, el grado de calentamiento oscilará entre 2 y 4,5 grados aproximadamente; es decir, entre lo significativo y lo catastrófico.

Los modelos no concuerdan entre sí debido, sobre todo, a sus discrepancias respecto al comportamiento futuro de la nubosidad. Si entendiésemos mejor las nubes podríamos estrechar ese intervalo y hacer predicciones más precisas. Pero es difícil ser exactos al respecto por dos razones: por un lado, el calentamiento afecta de distinta manera a diferentes tipos de nubes; por otro, la alteración de la nubosidad tiene distintas repercusiones en el calentamiento.

Esa interacción bidireccional se conoce como retroalimentación. Comprendemos bien algunos mecanismos climáticos de retroalimentación. Por ejemplo, el hielo marino, blanco y brillante, refleja la radiación solar hacia el espacio. Sin embargo, al fundirse deja al descubierto una masa de agua más oscura, con menor capacidad para reflejar la luz solar. El aire, entonces, se calienta, lo que causa la fusión de más hielo, que deja expuesto más océano oscuro, que, a su vez, refleja todavía menos luz solar. Este proceso establece una retroalimentación cíclica que acelera el calentamiento global. Entendemos bien esta retroalimentación positiva, y la mayoría de los modelos coinciden en buena medida en cómo influye en el cambio climático.

La retroalimentación de las nubes presenta una mayor complejidad. Como conservadores de un museo de historia natural, los climatólogos han creado una taxonomía aproximada de las nubes basándose en sus rasgos más distintivos. Dos de sus propiedades básicas son la altitud sobre la superficie terrestre y la opacidad. Las nubes bajas pueden ser bastante transparentes, como pequeñas y dispersas bocanadas de vapor en un día soleado, u opacas, como los mantos uniformes de la niebla costera. Las nubes altas también son muy variadas, desde briznas que permiten casi por completo el paso de la luz solar hasta las imponentes nubes con forma de yunque que ennegrecen el cielo durante una tormenta.

La utilidad de esa taxonomía estriba en que pone de manifiesto las principales formas en que las nubes calientan o enfrían el planeta. Algunas refuerzan el efecto invernadero porque atrapan el calor que asciende desde la superficie y e irradian una parte de él hacia el espacio. Sin ellas, la Tierra sería más fría. Las nubes en las frías capas atmosféricas superiores son particularmente eficientes en esto.

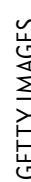
Otras nubes, sin embargo, tienen el efecto contrario: impiden que la luz solar alcance la superficie terrestre y, en consecuencia, mantienen frío el planeta. Ese efecto es más acentuado en las nubes bajas y gruesas. Esta influencia es hoy en día mayor que el efecto invernadero causado por la nubosidad. De hecho, el actual enfriamiento neto de las nubes es enorme, unas cinco veces mayor que el calentamiento debido a la duplicación de la concentración de $CO_2$.

De ahí se desprende que un mínimo cambio en la nubosidad puede tener grandes repercusiones. Una mayor presencia de nubes altas y transparentes, que dejarían pasar la radiación solar y retendrían el calor, aumentaría el calentamiento planetario. Por el contrario, más nubes bajas y opacas, que mantendrían alejada la luz del sol, traerían consigo un enfriamiento. También influye el desplazamiento de la nubosidad a otras partes. La migración de las nubes reflectantes desde las soleadas latitudes tropicales y subtropicales hacia los polos, fríos y oscuros, disminuye su ca-

PÁGINAS ANTERIORES: MICHAEL TUREK, GALLERY STOCK



LAS NUBES cubren más del 70 por ciento del planeta en un día normal y, por tanto, influyen notablemente en el clima. En la imagen, un manto de nubes se extiende sobre el océano Pacífico.




pacidad de enfriamiento. Su altitud constituye otro factor; unas nubes altas que asciendan todavía más potenciarán su efecto invernadero. Un mundo más cálido también podría alterar la proporción entre cristales de hielo y gotas de agua en las nubes frías, de modo que estas se volverían más húmedas y gruesas y, por tanto, más eficientes a la hora de obstruir el paso de la radiación solar incidente.

Los modelos lo tienen difícil porque ninguno de esos efectos se produce de forma aislada. Algunos muestran fuertes retroalimentaciones positivas que intensifican el calentamiento. En otros son levemente negativas, por lo que apenas lo reducen. Los modelos que predicen las retroalimentaciones positivas más intensas pronostican una sensibilidad climática de equilibrio cerca de los 4,5 grados, no de los 2.

Tampoco es de extrañar que los modelos no simulen la nubosidad con precisión, puesto que las nubes son a la vez grandes y pequeñas. Pese a estar formadas por diminutas gotas de agua y cristales de hielo, suelen cubrir más del 70 por ciento de la Tierra en todo momento. Al programar un modelo computacional, debe tomarse una decisión: o bien mirar en detalle y simular explícitamente el movimiento turbulento de las gotas que causa la formación y disipación de cada nube en un área reducida, o bien simular a gran escala los movimientos ascendentes y descendentes de aire que distribuyen vapor de agua por todo el planeta. Es imposible hacer ambas cosas, puesto que estudiar detalladamente el comportamiento de cada gota de agua en toda la atmósfera y en todo momento consume demasiada potencia computacional.

Por tanto, tratamos de combinar las dos escalas, la grande y la pequeña, siendo conscientes de que debemos hacer ciertas concesiones. Un modelo climático global intenta determinar parámetros simplificados que describan el comportamiento del conjunto. Se calculan según la física atmosférica y se perfeccionan comparando con modelos de escala más fina aplicados a pequeñas áreas del planeta. Con todo, no existe un método perfecto para mezclar lo grande y lo pequeño. Pero ¿podemos mejorar?

## CAMBIAR LAS FUERZAS

Abordemos el primer problema: las nubes altas. Las observaciones nos dan buenas razones para pensar que, literalmente, el cambio climático reconfigurará la atmósfera y elevará el límite entre la troposfera (la capa inferior, donde se producen los fenómenos meteorológicos) y la estratosfera. Suponemos que dicha elevación hará que las nubes altas asciendan también.

Mark Zelinka, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, ha analizado las consecuencias de tal ascensión. Afirma que, a medida que el planeta se calienta por acción del $CO_2$, trata de enfriarse liberando energía hacia el espacio en forma de radiación infrarroja. Si las nubes altas permanecen en su altitud habitual, se calentarán en sincronía con la atmósfera, lo que incrementará la cantidad de calor que liberen hacia el espacio. Zelinka y otros especialistas consideran, sin embargo, que las nubes altas se elevarán aún más, con lo que apenas variará su temperatura. Como consecuencia, no irradiarán al espacio el exceso de energía térmica, lo que causará un mayor calentamiento de la atmósfera. Ahí reside el mecanismo de retroalimentación positiva: que las nubes altas se eleven más y más reduce la capacidad del planeta de enfriarse y contrarrestar el calentamiento por sí mismo.

La segunda pregunta es: ¿qué ocurre con las nubes bajas? Los modelos parecen coincidir en que un mundo más cálido implica una reducción de la nubosidad baja. Sin embargo, Mark Webb, del servicio meteorológico del Reino Unido y del Proyecto de Comparación de Modelos de Retroalimentación de la Nubosidad, sabe que la cuestión es más compleja. Su grupo analiza las razones por las que un planeta más cálido podría tener menos nubes bajas. El mecanismo parece depender del modo en que se diluye la humedad del aire en las nubes bajas por acción de la convección o la turbulencia del aire más seco que está por encima. Según Webb, los modelos al uso no disponen de la suficiente capacidad computacional para representar esos procesos locales y terminan ofreciendo versiones aproximadas con otros métodos. Ciertos modelos indican cambios, grandes o pequeños, en la nubosidad baja. La mayoría pronostica una disminución. Una menor presencia de nubes bajas reduce la cantidad de radiación solar que se refleja hacia el espacio, lo que supone otro mecanismo de retroalimentación positiva.

Todavía, sin embargo, cabe considerar un efecto más. Las diferencias de temperatura y radiación solar entre el ecuador y los polos son, en buena medida, las impulsoras de la circulación general de la atmósfera. El aire tropical asciende y se enfría. Cuando llega a una determinada altitud, comienza a desplazarse lateralmente hacia los polos, más fríos. Al alcanzar los 30 grados de latitud, se ha enfriado lo suficiente como para hundirse de nuevo hacia la superficie y, en su descenso, se calienta y se seca. Por tanto, en tierra se observan climas lluviosos bajo la banda tropical de aire que se eleva y vierte agua al enfriarse, y climas desérticos bajo las bandas en las que el aire desciende.

El cambio climático alterará esa dinámica. Las latitudes altas septentrionales se calentarán más rápido que los trópicos, un fenómeno conocido como amplificación ártica, que reduce la diferencia de temperatura entre los polos y el ecuador. Esa reducción, ya en marcha, produce un cambio en todo el sistema. Lo más significativo quizá sea la expansión de los trópicos y el consiguiente desplazamiento de las bandas lluviosas y secas hacia los polos. Un posible efecto en la superficie es que las zonas de transición (el Mediterráneo, el Sahel, el suroeste de EE.UU.) se volverán más secas. De hecho, las observaciones por satélite que he analizado junto con Céline Bonfils, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, muestran que los regímenes de precipitaciones están cambiando según lo previsto. Si las nubes

acompañan el mencionado desplazamiento, migrarían mantos de nubes reflectantes desde latitudes bajas a otras más altas, donde la luz solar recibida es más débil, lo que reduciría su capacidad de enfriamiento en comparación con la que tienen en los trópicos.

En los modelos climáticos mejorados debe contemplarse otro factor que complica las cosas: un mundo más cálido puede modificar la configuración interna de las nubes. Las nubes contienen diminutas gotas de agua y cristales de hielo. Las bajas y gruesas tienden a contener más agua y son más opacas que las altas y delgadas, que suelen presentar más hielo. En un planeta más cálido, una mayor proporción de hielo se convertirá en líquido en las nubes altas, por lo que se volverán más opacas y obstaculizarán más el paso de la radiación solar. Según Zelinka, las nubes cuyo hielo se derrita se volverán más «aguadas», lo que reportará una retroalimentación negativa: un considerable efecto de enfriamiento que se opondrá al calentamiento.

## ¿Frío o caliente?

**A nivel global,** las variaciones en la latitud o la altitud de las nubes (o en las proporciones del vapor y el hielo que las componen) pueden calentar o enfriar la Tierra. Según datos obtenidos por satélite, algunos de los cambios que aquí se indican ya se están produciendo. De momento parecen favorecer un calentamiento, una tendencia que podría ampliarse.







### UNA PREDICCIÓN MÁS PRECISA

La naturaleza cambiante de las nubes parece dificultar aún más que los modelos puedan estrechar el pronóstico del calentamiento; es decir, reducir ese intervalo de entre 2 y 4,5 grados Celsius. Pero existe un potente conjunto de datos más relevante que cualquier otro: la historia de lo que ya ha ocurrido.

Hemos analizado nubes prácticamente desde que comenzamos a poner en órbita satélites meteorológicos en 1980, por lo que podemos comparar nuestros modelos con observaciones reales para mejorarlos. Sin embargo, algunos de los datos más antiguos pueden presentar problemas. Los satélites de observación terrestre están dotados de instrumentos similares a cámaras que detectan nubes mediante la identificación de objetos blancos sobre fondos oscuros; no obstante, tienen dificultades para distinguir entre varios objetos blancos, particularmente las nubes de hielo sobre un fondo nevado. Además, las nubes altas pueden enmascarar los cambios que se producen en la nubosidad baja.

Sin embargo, en los últimos diez años nuestras observaciones han mejorado considerablemente gracias, en buena parte, al programa A-train, de la NASA: seis satélites de observación terrestre que vuelan en formación y en una órbita estable. Dos de ellos, CloudSat y CALIPSO, facilitan información de inestimable valor. CloudSat emplea ondas de radio que atraviesan las nubes altas y delgadas para analizar las bajas y gruesas; también distingue si una nube precipita en forma de lluvia o nieve. CALIPSO utiliza un «radar» de tecnología láser (un lídar) para obtener imágenes de las nubes y determina si están compuestas por cristales de hielo o gotas de líquido.

Ambos satélites han ampliado nuestro conocimiento sobre la nubosidad y han aportado indicios sobre cómo pueden cambiar las nubes en el futuro. Por ejemplo, las observaciones parecen apoyar la idea de que, a medida que la Tierra se caliente, las nubes altas alcanzarán una altitud aún mayor y, con ello, se reducirá la capacidad del planeta de enfriarse por sí mismo. Por otro lado, un estudio reciente ha demostrado que solo unas pocas nubes altas contienen más agua y menos hielo de lo estimado, por lo que la retroalimentación negativa asociada al desarrollo de nubes «aguadas» podría no ser tan intensa como se había pensado.

CloudSat y CALIPSO se lanzaron en 2006. Sus registros cubren, por tanto, un tiempo demasiado corto para distinguir entre los efectos del cambio climático y los de la variabilidad climática natural de fondo. Para tomar perspectiva, los científicos están recopilando datos antiguos, tomados por sistemas que se diseñaron para observar patrones meteorológicos a corto plazo. En este sentido cabe destacar el trabajo realizado por el Proyecto Internacional de Satélites para Climatología de Nubes y el proyecto PATMOS-x. Mark Richardson, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, explica que aquellos satélites meteorológicos se diseñaron de distinta manera y tomaron datos en diferentes momentos del día. Aun así, pueden hallarse pistas en sus registros si se sabe dónde mirar. Zelinka y yo lo intentamos en 2015.

Comenzamos planteando una pregunta muy simple: ¿dónde se localizan en las observaciones las latitudes más nubosas y las más despejadas del planeta? Como cabía esperar, hallamos el



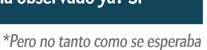


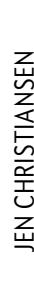











máximo de nubosidad en los trópicos. La nubosidad también era relativamente abundante a lo largo de unas bandas estrechas situadas en las latitudes medias, donde las tormentas están regidas por los vientos predominantes. Por el contrario, en las latitudes «desérticas» subtropicales, la elevada presión atmosférica se manifiesta en un régimen seco y soleado que impide la formación de nubes; esas son las bandas despejadas.

A continuación estudiamos si la ubicación de las latitudes más nubosas y las más despejadas variaba a lo largo del registro de datos meteorológicos tomados por satélite entre 1984 y 2009. Hallamos un hecho significativo: las latitudes medias más nubosas y las subtropicales más despejadas se están desplazando hacia los polos, tal y como habían pronosticado los modelos. Es más, cada conjunto de datos coincidía en que las variaciones en los patrones de circulación atmosférica arrastraban consigo los regímenes de nubosidad hacia los polos. Al comparar con modelos climáticos ejecutados en modos que no incluyen emisiones humanas, consideramos que los cambios eran demasiado grandes como para atribuirlos únicamente a la variabilidad natural. Además, eran más pronunciados de lo predicho.

Las consecuencias son preocupantes. Si las capas de nubes bajas reflectantes se desplazan demasiado hacia los polos, se reducirá de manera sustancial su capacidad de enfriamiento: bloquearán una radiación solar templada y débil en lugar de una tropical e intensa. El desplazamiento implicaría una intensa retroalimentación positiva y una alta sensibilidad climática.

Un estudio posterior, dirigido por Joel Norris, de la Universidad de California en San Diego, tuvo en cuenta conocidas discrepancias en el registro de datos por satélite y también halló un desplazamiento hacia el polo de los regímenes de nubosidad. De igual modo, los datos indican que las nubes altas podrían ascender a mayores altitudes. Los científicos discuten la relevancia de esos cambios y si pueden atribuirse a las emisiones de gases de efecto invernadero; a la disminución del número de partículas que el volcán Pinatubo emitió en 1991; a la variabilidad climática natural o una combinación de estos factores. Sin embargo, una cosa sí está clara: las observaciones a largo plazo no muestran ningún indicio de que las nubes vayan a ralentizar el calentamiento.

### LAS NUBES NO NOS SALVARÁN

De nuestras observaciones se desprende una idea cada vez más clara: las nubes altas se están elevando y la distribución de la nubosidad experimenta una migración general hacia los polos. Ambas tendencias acelerarían el calentamiento planetario. Las observaciones a corto plazo indican, por un lado, que una menor cubierta de nubes tropicales bloqueará menos radiación solar y reforzará el calentamiento; por otro, que el derretimiento del hielo de las nubes podría contrarrestar el calentamiento menos de lo pensado. Es poco reconfortante.

Así pues, ¿harán las nubes que la sensibilidad climática de equilibrio se acerque al extremo superior del abanico de predicciones? Esta es una cifra teórica que describe la respuesta climática final a la duplicación de $CO_2$ en la atmósfera. Sin embargo, el aumento de $CO_2$ no es teórico: su duplicación se alcanzará a mitad de siglo si no varían las tasas de emisión actuales. Necesitamos observaciones, modelos de alta resolución y creatividad para precisar cuánto se calentará el planeta.

Mientras, debemos ocuparnos de otro asunto que también se resiste a ceder: una parte importante de la población niega que los humanos estén cambiando el clima. Si las emisiones de $CO_2$ continúan creciendo, la Tierra se calentará considerablemente. Las nubes, al parecer, empeorarán las cosas o, como mínimo, no ayudarán a mitigar el problema. Esa tarea es nuestra.

**PARA SABER MÁS**

**External influences on modeled and observed cloud trends.** Kate Marvel et al. en *Journal of Climate*, vol. 28, n.º 12, págs. 4820-4840, junio de 2015.

**Evidence for climate change in the satellite cloud record.** Joel R. Norris et al. en *Nature*, vol. 536, págs. 72-75, agosto de 2016.

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Las nubes.** Jean-Pierre Chalon y Marc Gillet en «La atmósfera», colección *Temas de IyC* n.º 12, 1998.

**Cambios en el cinturón de lluvias.** Julian P. Sachs y Conor L. Myhrvold en *IyC*, mayo de 2011.

**Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto?** John Carey en *IyC*, enero de 2013.

PALEONTOLOGÍA

# LA EVOLUCIÓN DE LA PELVIS HUMANA

Nuevos descubrimientos paleontológicos suscitan preguntas acerca de la pelvis y del largo proceso que culminó con su peculiar forma

*Caroline VanSickle*



SALVO OTRA INDICACIÓN, TODAS LAS FOTOGRAFÍAS SON DE JOHN HAWKS, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON

**Soy paleoantropóloga,** una estudiosa de la evolución humana que pasa gran parte del tiempo examinando pequeños fragmentos de hueso. Me hago preguntas del tipo: ¿Cómo era el parto de las neandertales? ¿En qué momento surgieron las diferencias entre la pelvis masculina y la femenina en nuestros antepasados? O, ¿este pedazo plano de hueso es parte de un omóplato o de un coxal? Para llevar a cabo esa labor, he de identificar fragmentos óseos, averiguar cómo encajan en el esqueleto, determinar a qué especie fósil pertenecen y ubicar a esta en nuestro árbol evolutivo. Es como tratar de encajar un rompecabezas inacabable sin guía alguna y con multitud de piezas ausentes. A veces me han preguntado por qué alguien elige una carrera tan frustrante y la verdad es que no les faltaba algo de razón. Pero al final, se impone el afán de curiosidad: investigar cómo hemos llegado hasta aquí y por qué somos los únicos supervivientes de nuestra familia es demasiado tentador como para ignorarlo.

Hace entre trece y siete millones de años, nuestro linaje se separó del que culminó con el chimpancé, *Pan troglodytes*. El último antepasado común de ambos probablemente vivió en un ambiente forestal. Los especialistas creen que su esqueleto tuvo que estar adaptado a la vida arborícola y, por tanto, que



**Caroline VanSickle** investiga la evolución del dimorfismo sexual en la anatomía de los homininos fósiles. Es profesora titular visitante en el departamento de antropología del Colegio universitario Bryn Mawr en Pensilvania, colabora con el departamento homónimo de la Universidad de Wisconsin-Madison y con el Instituto de Estudios Evolutivos de la Universidad de Witwatersrand, en Sudáfrica.

**LA CUEVA RISING STAR, ubicada en las afueras de Johannesburgo, ha acaparado gran atención a raíz del hallazgo de un yacimiento con más de 1500 restos fósiles de homininos. En 2013, un pequeño grupo de científicos, entre ellos seis mujeres de pequeña talla y con experiencia en excavaciones paleontológicas en grutas, levantó un campamento en una explanada cercana a su entrada.**

su morfología debió de ser más parecida a la del chimpancé que a la del hombre. Tras la separación de aquel antepasado común, la senda que conduce hasta el ser humano quedó jalonada por numerosas especies, los homininos (antes llamados homínidos, con categoría de familia, hasta que la constatación de los estrechos lazos que nos unen con los grandes simios hizo rebajar esa distinción hasta el nivel de subfamilia o tribu). Algunos son nuestros antecesores directos, otros, en cambio, son primos evolutivos, descendientes del antepasado común que compartimos con el chimpancé, pero ajenos al linaje directo del cual somos los últimos representantes. Muchas veces resulta difícil discernir qué especies son ancestros directos y cuáles parientes más o menos lejanos, especialmente porque contamos con pocos fósiles que proporcionen esa información.

A finales del siglo XIX, cuando Charles Darwin andaba escribiendo sobre la evolución humana, muchos eruditos pensaban que la senda evolutiva que conducía hasta la humanidad era una línea recta. Semejante idea parecía razonable a sus ojos, pues apenas se habían hallado fósiles de homininos. Lo más sencillo era imaginar que a una especie simiesca de aspecto primitivo le sucedieron otras especies más modernas, en un proceso lineal que culminó con *Homo sapiens sapiens*. Hoy disponemos de muchos más fósiles para trazar el árbol genealógico de los homininos y sabemos que la evolución rara vez sigue una trayectoria recta. Como en tantas otras especies zoológicas, nuestro pasado evolutivo es enrevesado. Algunos rasgos surgieron en reiteradas ocasiones a lo largo del tiempo, la diversidad de especies es mayor de lo que suponíamos y tenemos pocas pistas sobre la senda que condujo hasta nosotros. Semejante situación hace que el descubrimiento de fósiles pertenecientes a una especie nueva pueda dar un vuelco a todo el esquema de la evolución humana de la noche a la mañana. En los últimos tiempos, ese esquema dista de ser un camino recto; muy al contrario, recuerda al entramado urbano de una gran ciudad, con callejones sin salida, desvíos, rotondas y caminos secundarios que representan tanto a fósiles conocidos como a especies de homininos que aún aguardan a ser descubiertas.

Mi labor como investigadora gira en torno a la evolución de la pelvis, una pieza importante de nuestra historia remota, ya que la propia de los homininos difiere notablemente de la del chimpancé y, por tanto, de la de nuestro último ancestro común. La mayoría de los paleoantropólogos está de acuerdo en que cuando los homininos empezaron a caminar sobre sus miembros posteriores, un modo de locomoción que llevamos practicando desde hace más de tres millones de años, la cintura pélvica cambió para facilitar la marcha bípeda. La pelvis del chimpancé se extiende por la parte inferior de la espalda para sostener la parte baja del cuerpo cuando se balancea en los árboles, pero, en contrapartida, entorpece su marcha cuando camina de pie, al tiempo que demanda más esfuerzo y gasto energético. En cambio, la de los homininos es corta y robusta, lo que ayuda a sustentar y equilibrar sin gran esfuerzo el peso de la parte superior del cuerpo durante la marcha. En los homininos fósiles observamos semejanzas con esa pelvis acortada nuestra, si bien ninguna es

idéntica a otra: cada especie presenta leves diferencias con respecto a las demás.

### FORMA Y FUNCIÓN DE LA PELVIS

La pelvis es una estructura compleja constituida por los dos coxales y por un hueso triangular llamado sacro. Este se encuentra en la base de la columna vertebral y cierra la pelvis por la parte posterior. Unido a los coxales, podemos ver el resultado como un anillo robusto de cuya parte superior sobresalen dos alas que se proyectan lateralmente; si apoya las manos sobre sus caderas, palpará los bordes externos de esas alas. El anillo protege el tramo inferior de los intestinos y soporta el peso de la parte superior del cuerpo. Además, en la mujer cumple la función de canal del parto. A su vez, cada coxal está compuesto por el ilion (el ala y la parte superior del anillo), el isquion (la parte inferior del anillo) y el pubis (la parte superior delantera del anillo).

El ilion y el isquion han sufrido numerosas modificaciones en el linaje evolutivo de los homininos desde que este se separara del linaje del chimpancé. Por tanto, esas partes de la pelvis difieren notablemente de las de nuestro pariente vivo más próximo. En el ser humano, las alas ilíacas de los coxales se proyectan hacia los lados de la pelvis. En cambio, en el chimpancé son altas y estrechas y arrancan de la parte posterior. Por su parte, el isquion, radicado a ambos lados de la pelvis en la zona sobre la que nos sentamos, es más corto que el del chimpancé.

En los homininos las alas ilíacas se hallan siempre a los lados, pero el ángulo que forman con el canal del parto varía de una especie a otra. En la nuestra, la orientación de las dos alas es casi paralela, por lo que, vista de frente, nuestra cadera muestra el aspecto de un cuenco cerrado. En el otro extremo del espectro hominino, en *Australopithecus afarensis* (especie a la que pertenece Lucy) las alas se abren mucho hacia los lados, confiriendo a la pelvis una forma más abierta que, vista desde el frente, recuerda más a una bandeja. En las pelvis fósiles de otros homininos, esa inclinación del ilion traza diversos ángulos intermedios entre la abertura máxima de Lucy y la más cerrada del hombre actual. El tamaño del isquion también difiere, desde la gran longitud que luce en Lucy hasta la reducida talla en nuestra especie.

### LA EXPLICACIÓN TRADICIONAL

Durante décadas, los paleoantropólogos han achacado las diferencias que separan a los homininos a los requisitos de espacio impuestos por el canal del parto. Pero esa interpretación está cambiando. En virtud de su pelvis alargada, producto de sus altas alas ilíacas y del isquion largo, el chimpancé dispone de un margen holgado para que las crías, dotadas además de un cerebro pequeño, nazcan sin dificultad. En cambio, el isquion corto y la reorientación del ala ilíaca hacen que el canal del parto humano sea más angosto, lo que, sumado al voluminoso cerebro del bebé, trae consigo un parto laborioso y doloroso.

Los especialistas planteaban que puesto que el nacimiento ha ganado en complejidad, en parte por el aumento del volumen cerebral, la pelvis (sobre todo la femenina) ha ido cambiando su forma paulatinamente para ensanchar el canal del parto. El resultado de tales adaptaciones es un conjunto de rasgos anatómicos que diferencian la pelvis femenina de la masculina y que son independientes de la talla corporal. Aunque este modelo es plausible, no concuerda con los indicios que sobre la pelvis nos aporta el registro fósil. Multitud de restos craneanos fosilizados revelan que el volumen cerebral empezó a crecer hace alrededor de dos millones de años, en la misma época en que surgía el género *Homo*. Pero de ese período conservamos muy pocos vestigios pélvicos. Hasta hace 15 años los más completos pertenecían a dos especies de *Australopithecus*, de alas ilíacas abiertas e isquiones largos, así como una única pelvis de *Homo erectus,* angosta, con alas en cuenco cerrado e isquiones cortos. Esa escasez de fósiles bien conservados parecía apoyar la idea de que la evolución de la pelvis en los homininos debía haber sido unidireccional. La propia de los miembros más recientes, entre ellos la nuestra, posee una forma distintiva, ligada en principio al gran volumen del cerebro, distinta de la de otras especies más arcaicas provistas de un cerebro más pequeño.

Sin embargo, algunas de las piezas extraviadas de este rompecabezas interminable tienen mucho que decir. Y lo que para una generación eran piezas desconocidas, pueden brindar a la generación siguiente grandes descubrimientos. En solo 15 años se ha sucedido una serie espectacular de hallazgos que aportan datos suficientes como para cambiar esa idea. Ahora hemos de dar con otra explicación para la evolución de la pelvis en los homininos, puesto que los nuevos fósiles no encajan con el esquema tradicional basado en la adaptación al parto.

### LOS FÓSILES DEL ÚLTIMO QUINDENIO

En 2003, Peter Brown y Michael Morwood, de la Universidad de Nueva Inglaterra en Armidale, publicaron un artículo donde anunciaban el descubrimiento de restos humanos en la cueva de Liang Bua, en la isla de Flores (Indonesia). Asignaron los vestigios a una nueva especie, *Homo floresiensis*, que ahora sabemos que vivió hace unos 100.000 años. Pese a pertenecer a nuestro género, su talla era diminuta, lo que les granjeó enseguida el apodo de «hobbits» en la prensa. Los restos óseos son, en rasgos generales, muy similares a los nuestros, hecho que justifica su inclusión en el género *Homo*, pero la pelvis es muy parecida a la de Lucy: su ala ilíaca es angulada y sobresale lateralmente, lo cual confiere al conjunto una forma abierta en lugar de cerrada, con un isquion sumamente largo. Semejante morfología era inédita en el género *Homo*, por lo que algunos plantearon en su momento que pudiera ser fruto de una patología, no de una nueva especie. Hoy, la mayoría de los expertos acepta que esos fósiles no corresponden a humanos con deformidades sino que encarnan, en efecto, a un nuevo pariente. En este momento, el debate se centra en cuál es su relación con otros homininos y cómo llegó hasta Flores.

EN SÍNTESIS

**La morfología de la pelvis humana** se explica por la adopción de la marcha bípeda y, en segundo lugar, por la necesidad de dar a luz bebés provistos de un cerebro voluminoso.

**Las pelvis de homininos fósiles** descubiertas en los últimos 15 años han puesto en entredicho la segunda parte de esa hipótesis, pues muestran rasgos anatómicos discordantes con el volumen cerebral atribuido a la especie o al linaje.

**Ahora se barajan otras razones,** como son la variación de la morfología pélvica con la edad o cambios en su constitución propiciados por la alimentación rica en carbohidratos, atípica en la historia de nuestra especie.

# El mapa de la evolución humana

**Los antropólogos** pensaban antaño que la evolución de nuestra especie era una senda simple de una sola dirección, donde los primeros homininos como *Ardipithecus* ocupaban el punto de partida, y el hombre moderno, la meta. Pero con el descubrimiento de nuevas especies fósiles, el árbol evolutivo ha ido creciendo hasta abarcar nuevos linajes y homininos que ni siquiera habíamos llegado a imaginar. Hoy en día, cuando los paleoantropólogos intentan trazar los lazos que unen los homininos fósiles, el mapa acaba convirtiéndose en un complejo entramado de vías con dos sentidos, callejones sin salida y nuevos linajes que acogen miembros que no sabemos cómo enlazar con los demás, circunstancia que indicamos en la figura como zonas cubiertas por nubes.

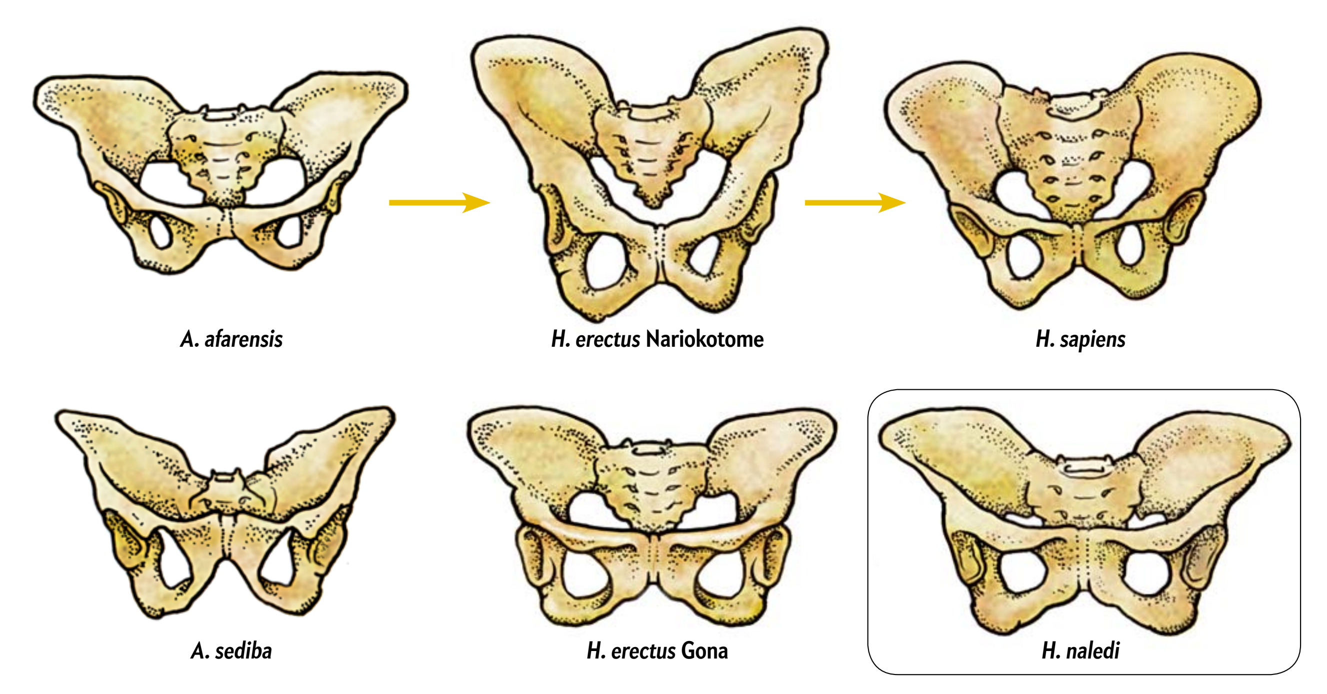



1. *Sahelanthropus tchadensis*
2. *Orrorin tugenensis*
3. *Ardipithecus ramidus*
4. *Australopithecus anamensis*
5. *Australopithecus afarensis*
6. *Australopithecus africanus*
7. *Australopithecus aethiopicus*
8. *Australopithecus robustus*
9. *Australopithecus boisei*
10. *Australopithecus sediba*
11. Primeros *Homo*
12. *Homo habilis*
13. *Homo erectus*
14. *Homo heidelbergensis*
15. *Homo floresiensis*
16. *Homo sapiens neanderthalensis*
17. *Homo sapiens sapiens*
18. *Homo naledi*

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

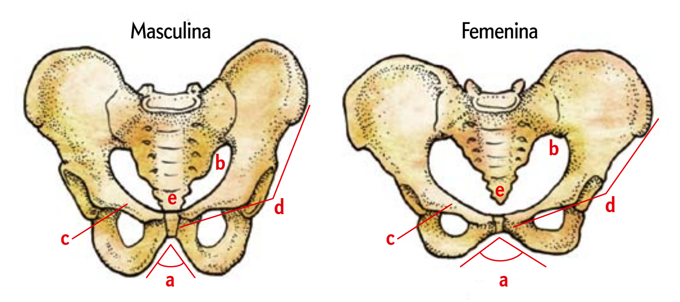
En 2008, Scott Simpson, de la Universidad Case Western Reserve de Cleveland, y su equipo publicaron otro ejemplo muy distinto de una pelvis femenina completa hallada en Gona, Etiopía, perteneciente a nuestro género. Por desgracia, no apareció acompañada de otros restos óseos que permitieran confirmar su identidad. No obstante, las capas de roca y sedimento en las que fue hallada permiten fecharla entre 900.000 y 1,4 millones de años. En esa época, solo un pariente nuestro vivía en África oriental: *Homo erectus*, primer miembro del género que dominó el fuego y se aventuró fuera del continente.

Antes de ese descubrimiento, la pelvis mejor conocida de *H. erectus* pertenecía a un esqueleto de 1,6 millones de años de antigüedad apodado el chico de Nariokotome, descubierto cerca del lago Turkana por Kamoya Kimeu, del Museo Nacional




LOS PALEOANTROPÓLOGOS pensaban que había una clara senda evolutiva que enlazaba la pelvis ancha de Lucy (*A. afarensis*) con la forma más angosta del chico de Nariokotome (*H. erectus*) hasta llegar a la estrecha cadera de los humanos actuales (*H. sapiens*). Los descubrimientos recientes han cambiado esa idea: *A. sediba* posee una pelvis estrecha; la de *H. erectus* hallada en Gona es ancha, y la recién descubierta de *H. naledi* probablemente se parezca a la de Lucy. La reconstrucción hipotética de esta última a partir de los restos fósiles, muy fragmentarios, es aún objeto de debate (Las pelvis no están dibujadas a la misma escala.)

de Kenia. La pelvis del joven se encontró aplastada e incompleta, pero tomando como referencia el esqueleto de un adolescente actual, el paleoantropólogo Alan Walker, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Christopher Ruff, de la Escuela de Medicina Johns Hopkins, esbozaron una reconstrucción preliminar que mostraba una pelvis alta y estrecha. En cambio, la pelvis de Gona es corta y ancha y pertenece a un individuo mucho más pequeño. Posee un isquion más corto que el de Lucy o el fósil de Liang Bua, pero conserva la marcada amplitud de las alas ilíacas abiertas que son propias de los homininos primitivos. Algunos opinan que su pequeño tamaño, similar al de Lucy, y la forma del ala ilíaca delatan que no se trata de un *H. erectus*, extremo sobre el que aún no existe consenso por la carencia de datos craneales. Si finalmente la pelvis de Gona se atribuyese a *H. erectus,* significaría que nos enfrentamos a la interpretación




EN NUESTRA ESPECIE son varios los rasgos esqueléticos que diferencian la pelvis femenina de la masculina. En comparación con la del varón, la femenina presenta un mayor ángulo subpúbico (*a*), la escotadura ciática es más abierta (*b*), el pubis es más largo (*c*), las alas ilíacas se proyectan más lateralmente (*d*) y el sacro es más corto y menos curvo (*e*). Todas esas diferencias hacen que el canal del parto de la pelvis femenina sea mayor que su equivalente masculino.

de un fósil enigmático: dos especies del género *Homo* cuyas alas ilíacas recuerdan por su forma a las de los australopitecos. Y para colmo, esa anatomía se encuentra en una especie (*H. erectus*) que sabemos provista de un cerebro más voluminoso que el de Lucy y su grupo.

Poco después de que salieran a la luz los homininos recientes con pelvis morfológicamente «primitiva», sobrevino el descubrimiento de una morfología «moderna» en un hominino arcaico. En 2010, el paleoantropólogo Lee Berger, de la Universidad de Witwatersrand, y su equipo anunciaron el hallazgo en Sudáfrica de dos esqueletos, uno de un varón adolescente y otro de una mujer adulta, que atribuyeron a un nuevo hominino bautizado como *Australopithecus sediba*. Ambos conservaban fragmentos de la pelvis y fue posible reconstruirlas enteras combinando las partes conservadas de los dos individuos. El resultado fue una pelvis alta con isquiones cortos, es decir, similar a la del *H. erectus* de Nariokotome y a la nuestra. En cambio, el cráneo, la dentición, los brazos, las piernas y el tórax recordaban a los de otras especies de *Australopithecus*, por lo que esta pelvis de tipo *Homo* acabó yendo a parar a un género diferente. Además, la pelvis de *A. sediba* nos plantea otro enigma: similar por su tamaño cerebral y muchos otros aspectos a Lucy, los miembros de su especie no tuvieron la necesidad de afrontar el nacimiento de retoños con cerebros voluminosos. De hecho, los paleoantropólogos no logran discernir por qué motivo su pelvis evolucionó hasta semejarse a la nuestra.

Para rematar esta racha inesperada de hallazgos, en 2015 se anunció otra nueva especie de hominino, descubierta en circunstancias harto especiales. En una cueva denominada Rising Star cercana a Johannesburgo, dos espeleólogos hallaron una cámara repleta de fósiles de hominino al final de un estrecho y sinuoso conducto. Era el yacimiento más rico de todos los hallados en ese continente. Berger, que casualmente estaba trabajando en las




EN LA SALA ACORAZADA donde se custodian los fósiles en la Universidad de Witwatersrand, en Sudáfrica, la autora (*izquierda*) enseña a la doctoranda Pianpian Wei cómo comparar los restos pélvicos de *H. naledi* con los de otros homininos y primates.

proximidades, se apresuró a organizar un equipo de excavación que debía reunir unos criterios muy selectos: además de ser científicos avezados en las labores de excavación, debían ser de talla baja y lo bastante delgados para pasar a través de angosturas de menos de 18 centímetros. El equipo de Rising Star recuperó más de 1500 fósiles de homininos, un hallazgo espectacular sin precedentes.

A continuación, un nutrido equipo de científicos de todo el mundo, en su mayoría en las primeras etapas de su carrera, analizó los restos y los asignó a una especie nueva: *Homo naledi*. (Fue en el transcurso de este proyecto cuando, siendo una de esas investigadoras noveles, me pregunté si algunos de los fragmentos planos de huesos pertenecerían al omóplato o a la cadera.) Lo más notable del descubrimiento es la vasta riqueza de la colección. Normalmente, los paleoantropólogos nos entusiasmamos con un solo pedazo de mandíbula, pues el hallazgo de cualquier pieza del rompecabezas es motivo de alegría. Pero encontrar más de 1500 restos fósiles de la misma especie pertenecientes a distintos individuos y edades con todas las partes del esqueleto representadas, incluidos 41 fragmentos de la pelvis, es como ser agraciado con el gran premio de la lotería.

Así y todo, surgieron nuevas preguntas, pues lo que nos contaban sobre la evolución de los homininos era confuso. El descubrimiento de *H. naledi* ha cambiado rotundamente el árbol evolutivo y todavía andamos debatiendo dónde habría que situar las nuevas ramas. Además, los fósiles eran los únicos presentes en esa parte de la cueva, por lo que no es posible afirmar con qué fauna convivieron. A diferencia de otros yacimientos cavernarios, donde los huesos permanecen confinados en rocas que permiten conocer su antigüedad, los restos de *H. naledi* se hallaron en un sedimento nada fácil de fechar. Por todas esas razones, resulta especialmente difícil determinar cuándo vivieron y murieron estos individuos. Pero independientemente de la cronología que finalmente tenga, *H. naledi* será especial. Algunos de sus rasgos se verán o bien demasiado primitivos o bien demasiado modernos para su antigüedad. El cráneo se asemeja al de *H. erectus*, pero su tórax es similar al de *A. afarensis*, en tanto que sus piernas y sus pies recuerdan más a los nuestros [*véase* «El misterioso *Homo naledi*», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, mayo de 2016].

Aunque fragmentarios, los restos pélvicos de *H. naledi* indican que su ilion era como el de Lucy: en ángulo y proyectado hacia los lados. Esta morfología debió hacer que la parte superior de la pelvis fuese más abierta que la del hombre actual. En cambio, su isquion era corto, a diferencia del de Lucy o del del fósil de Liang Bua, con un aspecto más similar a los de Gona,






LOS ANGOSTOS Y TORTUOSOS PASAJES y los abruptos afloramientos de roca que alberga la cueva Rising Star impiden el acceso a todo aquel que no sea delgado y bajo. Mientras el primer miembro de este grupo selecto se abre camino en la cueva, el resto del equipo se reúne ante la pantalla para seguir su progreso captado por las cámaras.

Nariokotome y los humanos actuales. En definitiva, la amalgama de rasgos arcaicos y modernos en la pelvis fue algo relativamente común en el pasado, tal y como vemos en *A. sediba*, *H. erectus*, *H. floresiensis* y *H. naledi*.

### REDIBUJAR EL MAPA EVOLUTIVO

Con estas nuevas piezas del rompecabezas en la mano, todavía estamos tratando de trazar nuestro mapa evolutivo. Ahora disponemos de tres especies del género *Homo* con caderas similares a las de los *Australopithecus* (al menos, en la forma del ala ilíaca) y una especie de *Australopithecus* con caderas similares a las humanas. La hipótesis ortodoxa que afirma que la pelvis evolucionó para adaptarse al aumento del volumen craneano no explica la existencia de estos fósiles: vemos rasgos de *Australopithecus* en homininos con cerebros voluminosos y, en cambio, la pelvis más parecida a la nuestra pertenece a un *Australopithecus* de cerebro reducido.

Además, contemplamos demasiada variación como para seguir pensando que la evolución de la pelvis debió ser unidireccional. Después de redibujar el mapa evolutivo con cada nuevo descubrimiento, surgen dos grandes incógnitas: ¿Por qué la evolución de la pelvis es tan variable? Y si el parto no fue el impulsor de cambios evolutivos en ella, ¿qué lo fue? Si las imposiciones del alumbramiento no explican la morfología pélvica en el pasado, tal vez no sepamos realmente por qué aparecieron las diferencias anatómicas actuales. Como ninguna de estas preguntas tiene una respuesta sencilla, hemos empezado a barajar otras hipótesis más complicadas.

Una explicación plausible tiene que ver con los cambios en la forma de la pelvis que se suceden a lo largo de la vida de cada persona. En un estudio sobre las diferencias en distintas edades, Alik Huseynov, de la Universidad de Zúrich, y sus colaboradores propusieron que los cambios en la morfología pélvica pueden reflejar diferencias de edad. Tras estudiar una pequeña muestra de individuos, descubrieron que su forma varía con la edad, incluso en los adultos, y que en la mujer lo hace más que en el varón. Determinar la edad de la muerte de un individuo que ha completado el desarrollo no es sencillo, aun en esqueletos contemporáneos, y es casi imposible en otros homininos. Pero sabemos que algunos individuos vivieron lo suficiente como para desgastar los molares, mientras que otros no. Esto significa que quizás hubo homininos lo suficientemente longevos como para experimentar los cambios pélvicos que el estudio de Huseynov ha revelado en los humanos actuales. Los paleoantropólogos no habían buscado ese tipo de variación en el desarrollo porque ignoraban que existiera. Aunque el registro

| Modelo tradicional | | Nuevos descubrimientos | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Australopitecus*** | ***Homo*** | ***A. sediba*** | ***H. erectus* de Gona** | ***H. floresiensis*** | ***H. naledi*** |
| Ilion abierto | Ilion cerrado | Ilion cerrado | Ilion abierto | Ilion abierto | Ilion abierto |
| Isquion largo | Isquion corto | Isquion corto | Isquion corto | Isquion largo | Isquion corto |
| Cerebro pequeño | Cerebro grande | Cerebro pequeño | Cerebro grande | Cerebro pequeño | Cerebro pequeño |

EL DESCUBRIMIENTO de cuantiosos fósiles de homininos en los últimos quince años ha difuminado los límites entre los atributos propios de los *Australopithecus* y los del género *Homo*. Según el modelo tradicional, las pelvis fósiles provistas de un ala ilíaca abierta y un isquion largo estarían asociadas a especies de cerebro pequeño del género *Australopithecus* (*verde*), mientras que el ala cerrada y el isquion corto delatarían a especies de gran volumen cerebral del género *Homo* (*naranja*). Sin embargo, en los nuevos fósiles estos rasgos no aparecen combinados según lo esperado. Por ejemplo, *A. sediba* posee el cerebro pequeño típico de su género, pero al mismo tiempo una pelvis similar a la de *Homo*. Por su parte, la combinación de características de *H. naledi* es exclusiva de esta especie.







LA EXTRAORDINARIA ABUNDANCIA y el buen estado de conservación de los fósiles de *H. naledi* han hecho posible la reconstrucción de partes prácticamente íntegras de su anatomía, como la mano y el pie (*izquierda, imagen superior e inferior*). En otros casos, como en la reconstrucción del cráneo adulto (*derecha*), los fragmentos fósiles se han completado con medios digitales mediante su reproducción en una impresora tridimensional y el pintado en blanco de las partes no conservadas.

fósil es demasiado escaso y fragmentario para demostrar que las diferencias en la pelvis de los homininos dependen de la edad en el momento de la muerte, si la hipótesis de Huseynov fuera cierta, sería una variable a tener en cuenta en la interpretación de las diferencias entre los fósiles.

Otra posible respuesta radica en el papel de la nutrición en la formación del esqueleto. En un artículo publicado en 2012, Jonathan Wells, del Colegio Universitario de Londres, y sus coautores plantearon la hipótesis de que los problemas en el parto surgieron por primera vez con el florecimiento de la agricultura, que modificó drásticamente la alimentación humana. Wells y sus colaboradores sostienen que la pelvis femenina no impone severas restricciones en el parto y achacan a la alimentación rica en carbohidratos que hemos empezado a ingerir merced al cultivo de los cereales el haber modificado su forma, de tal modo que ahora dificulta el alumbramiento. Esta hipótesis puede ser otro ejemplo de cómo los cambios durante la vida afectarían a la morfología pélvica. También sirve básicamente para ilustrar la necesidad de seguir estudiando en esta dirección y, además, presenta una idea interesante que, de ser cierta, tendría dos implicaciones importantes. En primer lugar, tal y como apuntan los recientes restos fósiles, el parto podría no ser el único condicionante de la evolución de la pelvis en los homininos. Y en segundo lugar, que los especialistas necesitamos conocer mejor la alimentación de los homininos para interpretar las diferencias en las pelvis fósiles.

Es evidente que comprobar esta y otras hipótesis parecidas exige ahondar en las razones de las diferencias patentes en la morfología de la pelvis humana actual. Debemos entender esto bien antes de intentar trazar la senda evolutiva que separa las pelvis del registro fósil. Mi opinión es que ha sido tanto el tiempo invertido en explicar cómo el parto influyó en la evolución de la pelvis de los homininos —hasta hace poco no hemos reparado en que podría no ser la razón—, que la verdadera explicación podría radicar en algo que hayamos pasado por alto. Es hora de buscar lo que desconocemos. Por fortuna, la atracción por este misterio compensa todas las frustraciones que acarrea el estudio de fragmentos. IyC



PARA SABER MÁS

**The reconstruction of the pelvis.** A. Walker y C. B. Ruff en *The nariokotome* Homo erectus *skeleton*, dirigido por A. Walker y R. E. Leakey, págs. 221-233. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
**A female *Homo erectus* pelvis from Gona, Ethiopia.** S. W. Simpson et al. en *Science*, vol. 322, págs. 1089-1092, 2008.
**A partial pelvis of *Australopithecus sediba*.** J. M. Kibii et al. en *Science*, vol. 333, págs. 1407-1411, 2011.
**The obstetric dilemma: An ancient game of Russian roulette, or a variable dilemma sensitive to ecology?** J. C. K. Wells, J. M. DeSilva, y J. T. Stock en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 149 (S55), págs. 40-71, 2012.
**Primitive pelvic features in a new species of *Homo*.** C. VanSickle et al. en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 159 (S62), pág. 321, 2016.
***Homo naledi* pelvic remains from the Dinaledi chamber, South Africa.** C. VanSickle et al. en *Journal of Human Evolution*, en línea, noviembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

**El difícil trance del parto humano.** Pat Shipman en *IyC*, mayo de 2014.

FOTOGRAFÍA DEL CRÁNEO RECONSTRUIDO POR BRETT ELOFF PHOTOGRAPHY

por Sílvia Abril y Crisanto Gómez

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**



LA HORMIGA ARGENTINA es uno de los organismos sociales con más éxito biológico del planeta. En la imagen, una obrera.

LAS PUPAS DE LA HORMIGA ARGENTINA, a diferencia de las de otras especies de hormigas, carecen de capullo de seda, un rasgo que permite observar su desarrollo. El marrón oscuro del cuerpo y los ojos compuestos negros indican que esta pupa se halla a punto de eclosionar. Se reconoce que es una reina por las alas y el mayor tamaño del cuerpo.

# Comunicación química en las hormigas reina

## El estudio de las señales olfativas que emiten permite identificar su estado reproductor

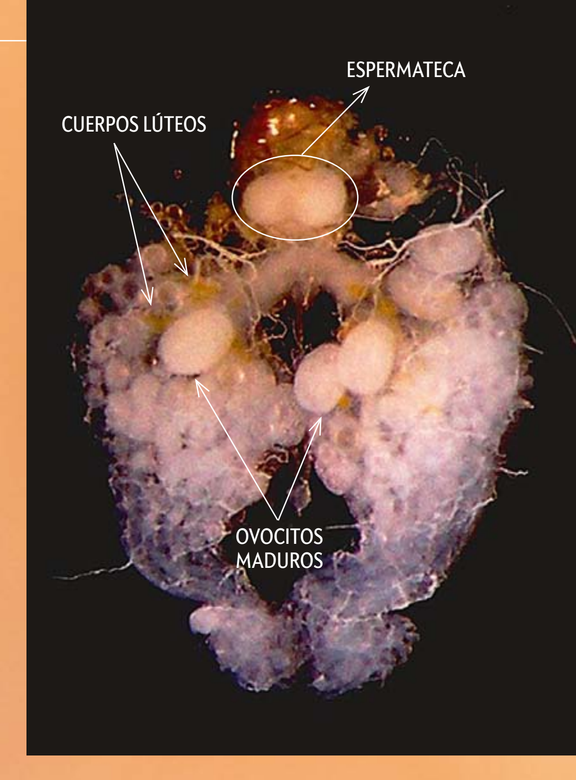
La comunicación química desempeña un papel importantísimo en la organización de una colonia de hormigas. Mediante señales químicas captadas por sensilias olfativas ubicadas en las antenas, estos insectos intercambian información relacionada con múltiples aspectos organizativos, una comunicación que resulta fundamental en la estructura de sus sociedades.

Uno de los compuestos más usados por los insectos sociales son los denominados hidrocarburos cuticulares. La principal función de estas moléculas, que impregnan la cutícula que recubre el cuerpo, consiste en evitar la deshidratación del insecto. Pero también es ampliamente conocido su papel en la transmisión de información. Las reinas, por ejemplo, comunican su estado reproductor por medio de la emisión de patrones concretos de hidrocarburos, algunos de los cuales son exclusivos de su casta.

En nuestras investigaciones intentamos descifrar el código químico emitido por las reinas de hormiga argentina (*Linepithema humile*, Mayr), una de las cien especies exóticas más dañinas del planeta, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Una de las claves del éxito invasor de esta especie es su capacidad para crear «supercolonias», formadas por miles de nidos que pueden llegar a abarcar una extensión de hasta 6000 kilómetros en Europa, lo que supone la mayor unidad cooperativa de la naturaleza conocida hasta el momento.

Mediante técnicas de cromatografía de gases, analizamos e identificamos los perfiles de hidrocarburos cuticulares de reinas criadas en el laboratorio. Para ello, recolectamos pupas de reinas en el campo y las incubamos en nidos artificiales hasta que nacen. A continuación controlamos varios factores de las reinas, como la edad, el grado de fertilidad o el estado de fecundación (a través de disecciones del aparato genital); calculamos también índices ováricos y la tasa de puesta de huevos. La relación entre estos parámetros y el perfil de hidrocarburos cuticulares nos permite identificar las señales de reproducción específicas que emplea esta especie invasora. Dicha información nos ayudará a entender mejor la complejidad de la cohesión social en las supercolonias y, más en detalle, la función de las reinas en dicha cohesión.

*—Sílvia Abril y Crisanto Gómez*
*Dpto. de Ciencias Ambientales*
*Facultad de Ciencias*
*Universidad de Gerona*




EN LOS OVARIOS de una reina puede observarse la espermateca llena de esperma, lo que indica que está fecundada; la presencia de cuerpos lúteos sugiere una puesta de huevos reciente; y varios ovocitos maduros en el extremo de los ovarios muestran la elevada actividad ovárica en el momento de la disección.



REINA RODEADA DE OBRERAS. La marca rosa sobre el dorso, realizada con pintura permanente a base de aceite, permite identificar a las reinas investigadas en el laboratorio.

DAVID ESTANY TIGERSTRÖM (*imagen de fondo y reina con marca*); SÍLVIA ABRIL (*pupa y ovarios*)

por Elena Ausejo

**Elena Ausejo** es catedrática de historia de la ciencia en la Universidad de Zaragoza y miembro de la Academia Internacional de Historia de la Ciencia.



# La aritmética moderna en la España renacentista

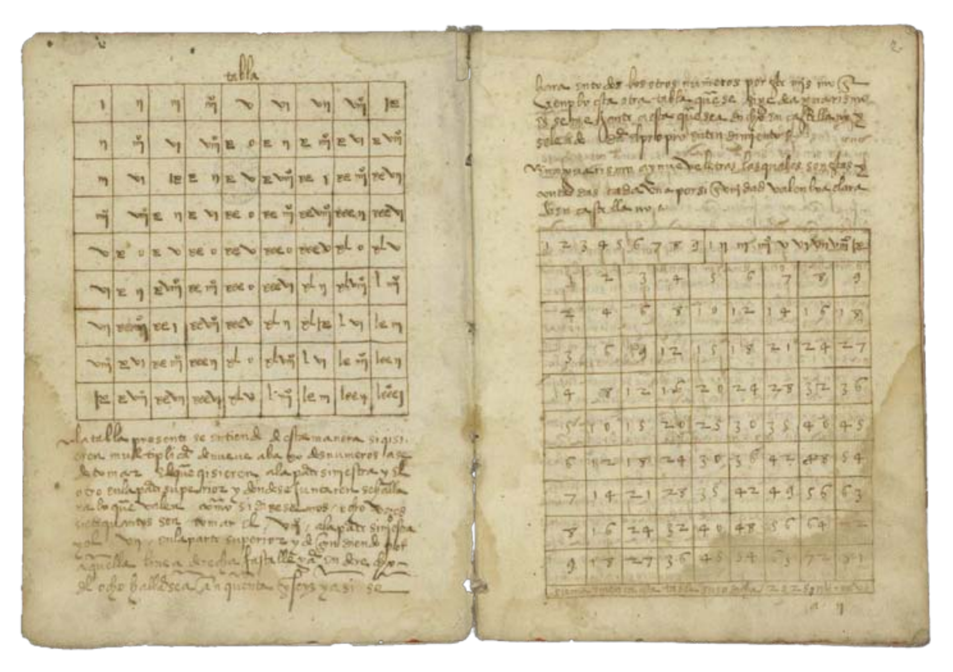
## La llegada de la numeración indoarábiga, una historia transversal

El sistema de numeración más utilizado en la actualidad fue conocido en el mundo occidental a finales del siglo x. En el *Códice Albeldense*, el escriba Vigila dio por universalmente reconocido el talento indoarábigo en aritmética y geometría por su capacidad de expresar cualquier cantidad mediante unas figuras: las cifras del 1 al 9 escritas de derecha a izquierda. Dicha demostración de talento residía en la superioridad del sistema posicional sobre el sistema aditivo de la numeración romana entonces en uso en el Occidente latino. Su llegada señaló el inicio de un proceso de diferenciación del lenguaje matemático mediante el desarrollo de un simbolismo específico y una notación propia.

Fue en la Italia del siglo xiii, el territorio cristiano más avanzado en la transición del feudalismo al mercantilismo, donde la asimilación y el desarrollo de las fuentes matemáticas árabes y latinas procedentes de al-Ándalus y los reinos hispanos encontró terreno abonado, se extendió con la introducción del papel y se generalizó, ya en el Renacimiento, mediante la imprenta. Una profusión de libros de aritmética escritos no solo para comerciantes, contables y banqueros, sino también para escribanos, administradores, secretarios y cortesanos, pusieron la aritmética y el álgebra en el contexto de la vida comercial y cotidiana.

Esas aritméticas mercantiles posibilitaron la expansión del sistema de numeración decimal posicional, que se generalizó en Europa durante la primera mitad del siglo xvi. La sustitución de los números romanos por las cifras indoarábigas no fue un mero cambio de caracteres gráficos. Conllevó también la asimilación de conceptos matemáticos básicos del mundo moderno: a diferencia de los siete signos de la numeración romana, los diez dígitos del sistema decimal posicional no eran símbolos de valor numérico fijo, sino dependiente de su posición relativa.

En la península ibérica, la *Suma de la art de Arismetica* de Francesch Santcliment fue el primer libro de matemáticas impreso, originalmente en catalán (Barcelona, 1482) y cuatro años después en español (Zaragoza, ca. 1486) bajo el nuevo título de *Cōpilatio de arismetica sobre la arte mercantiuol*. Pero no se trataba esta de una mera traducción del texto catalán, sino de una nueva edición, adaptada a los sistemas de medición aragoneses, que excluía el tratamiento de los quebrados. La autoría figura en el colofón a nombre de Franciso Sanclimente, de profesión *ensenyante*. Es más, desde 2003 se conocen pruebas documentales de la presencia en Zaragoza de Francisco San Climent, *scriptor de diversas letras* o escritor de libros, entre 1483 y 1485.



TABLAS DE MULTIPLICAR en números romanos (*izquierda*) e indoarábigos (*derecha*).

FUENTE: *ARTE DE ARISMETICA*, BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA

No se conservan otros incunables matemáticos producidos en la península ibérica, ni tampoco ningún otro impreso matemático publicado en catalán o español en el siglo xv, período que culminó —en cuanto a la expansión de las matemáticas en el Occidente latino— con la publicación, en italiano, de la *Summa de arithmetica, geometria, proportioni e proportionalità* (Venecia, 1494), del franciscano Luca Pacioli, un tratado teórico-práctico de aritmética, álgebra, geometría práctica y contabilidad. Muestra de la rapidez con la que evolucionó la formación matemática de la burguesía y de cómo la aritmética promovió el desarrollo del simbolismo matemático y del álgebra, fue

el primer tratado impreso de contabilidad de doble entrada, el texto matemático más exhaustivo de su época y uno de los de más amplia circulación internacional.

Así, la *Suma de Arithmetica pratica y de todas Mercaderias Con la Horden de contadores* (Valladolid, 1546), de Gaspar de Texeda, escribano de Zaragoza, fue la primera aritmética impresa en la monarquía hispánica que incorporó la moderna contabilidad de Pacioli. Tres décadas antes, mosén Juan Andrés, musulmán renegado, se había basado ya en Pacioli para escribir su *Sumario breue d'la pratica dela arithmetica de todo el curso de larte mercãtiuol bien declarado: el qual se llama Maestro de cuento* (Valencia, 1515), una aritmética que permite constatar la pervivencia del sustrato matemático árabe en las Españas de principios del siglo XVI.

Por otra parte, la biografía de Andrés evidencia el modo en que la producción de aritméticas mercantiles ofrecía posibilidades de reorientación de una carrera profesional conforme esta disciplina matemática se convertía en parte esencial del mundo renacentista y, en consecuencia, de la educación de la incipiente burguesía. Alfaquí de Játiva convertido al cristianismo en 1487, Andrés desarrolló una carrera eclesiástica dedicada a la conversión de musulmanes como predicador, traductor y autor de textos religiosos. Afincado en Zaragoza bajo la protección del predicador real Martín García, Inquisidor de Aragón, amplió su campo de producción escrita a las matemáticas en 1514, en torno a los setenta años, tal vez ante la necesidad de procurarse un nuevo protector. En 1512, hallándose en la Curia Romana su mentor, Martín García, había sido nombrado obispo de Barcelona, por lo que no volvería a Zaragoza. Se explicaría así la edición de la variante de su aritmética dedicada al Conde de Oliva (Valencia), Serafín de Centelles y Urrea (1460-1536), aristócrata típicamente renacentista perteneciente a la nueva nobleza. Exitosamente dedicado tanto al mecenazgo literario como a la explotación comercial de la producción de sus territorios, ejerció como contador (1514-1517) y diputado (1530-1532) de la *Generalitat*, por entonces encargada de la recaudación de impuestos indirectos.

La publicación de aritméticas mercantiles cada vez más didácticas se generalizó en Europa durante la primera mitad del siglo XVI, lo que indica que esta línea editorial pudo ser, en muchos casos, un buen negocio. Tal es el caso de dos reputados calígrafos renacentistas que se embarcaron en la edición de aritméticas: Giovanni Antonio Tagliente, en Venecia, seguido por Juan de Icíar, en Zaragoza.

El *Libro intitulado Arithmetica practica muy vtil y prouechoso para toda persona que quisiere exercitar se en aprender a contar* de De Icíar (Zaragoza, 1549), que cierra la serie de aritméticas no algebraicas publicadas en español en la primera mitad del siglo XVI, abordó la principal dificultad de asimilación de la aritmética mercantil, que no se hallaba ni en la introducción de los números indoarábigos ni en los nuevos algoritmos, sino en la necesidad de operar con sistemas de pesos, medidas y monedas no decimales. A tal fin propuso el uso de tablas de fracciones de submúltiplos de la unidad superior para todas las unidades de medición en Aragón. Sus detalladas explicaciones de los procesos de cálculo con submúltiplos conectaban paso a paso la práctica mercantil cotidiana con la nueva aritmética, pues implicaban un claro entendimiento del concepto de valor posicional de las cifras y de la propiedad distributiva de la multiplicación respecto de la suma.

Esta *Arithmetica practica* fue el primer fruto de la asociación de De Icíar con el infanzón Miguel de Suelves, librero de profesión y editor de De Icíar a partir de 1553. En 1555, Suelves comercializó conjuntamente, en un volumen facticio, el *Arte svbtilissima, por la qual se enseña a escreuir perfectamente* de De Icíar y un anónimo, *Arte breve y provechoso de cuẽta Castellana y arithmetica donde se muestrã las cinco reglas de guarismo por la cuẽta castellana, y reglas de memoria*, manteniendo también la comercialización de ambas obras por separado. La iniciativa debió de resultar exitosa, pues entre 1559 y 1566 se publicaron tres ediciones de este formato combinado unificado bajo el título de *Libro Subtilissimo, por el qual se enseña a escreuir y contar pfectamẽte el qual lleua el mesmo orden que lleua vn maestro con su dicipulo,* la primera obra en español dedicada a la enseñanza de la escritura y la aritmética, esta última complementada: *Y agora nueuamẽte en esta postrera impression se han añadido vnas cuentas muy graciosas y prouechosas, sacadas del libro de Fray Iuan de Ortega*.

Naturalmente, la referencia al dominico Fray Juan de Ortega, creativo autor de una reputada aritmética originalmente publicada en Lyon (1512), traducida al francés y al italiano (1515) y reeditada en Sevilla (1534, 1537 y 1542), venía a revalorizar la nueva edición, aunque ambas eran reelaboraciones del *Arte breue y muy prouechoso de cuẽta castellana y arismetica* (Toledo, 1539) de Juan Gutiérrez de Gualda, sacerdote de Villarejo de Fuentes. El título anunciaba con total claridad que la obra contenía cálculo con números romanos (*cuenta castellana*) e indoarábigos (*arismetica, guarismo*).

Esta aritmética fue, sin lugar a dudas, la más elemental de las impresas en España durante la primera mitad del siglo XVI, pero no la menos necesaria: se conocen nueve ediciones realizadas a lo largo de treinta años (1539-69), dos en Castilla y siete en Zaragoza, estas últimas en un intervalo de catorce años (1555-69). Estos números indican que la edición de aritméticas mercantiles emergió como área de negocio en el ámbito de la formación —no necesariamente universitaria— de la incipiente burguesía en España. No solo los comerciantes, sino también los profesionales liberales fueron apreciando de forma progresiva las ventajas de la nueva aritmética basada en los números indoarábigos y la importancia de su asimilación como parte de su formación. Y, en este período de transición de la aritmética tradicional a la moderna, los libros elementales también tuvieron un público. De hecho, la fuente de inspiración y extracción de la aritmética de Gutiérrez parece hallarse en un tratado manuscrito del siglo XVI mucho más completo, el *Arte de arismetica* conservado en la Biblioteca Nacional, con sus números romanos manuscritos en minúsculas, que apenas si conocemos.

**PARA SABER MÁS**


**Summa de l'art d'aritmètica.** Francesc Santcliment. Introducción, transcripción y notas a cargo de Antoni Malet. Eumo editorial, Vic, 1998.

**La imprenta de los incunables de Zaragoza y el comercio internacional del libro a finales del siglo XV.** Miguel Ángel Pallarés Jiménez. Institución Fernando el Católico (CSIC), Zaragoza, 2003.

**New perspectives on commercial arithmetic in Renaissance Spain.** E. Ausejo en *A Delicate balance: Global perspectives on innovation and tradition in the history of mathematics*, coordinado por David Rowe y Wann-Sheng Horng, págs. 181-208. Birkhäuser, Springer International Publishing Switzerland, 2015.


**EN NUESTRO ARCHIVO**


**El retrato de Luca Pacioli.** Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2014.

por Claudia Wallis

**Claudia Wallis** es una premiada escritora científica y antigua directora editorial de *Scientific American Mind*.



# Marihuana y cerebro adolescente

## ¿Hasta qué punto hemos de estar preocupados?

Desde hace casi un siglo, los padres de Estados Unidos no han cesado de advertir a los adolescentes sobre los peligros de la marihuana, que estos han ignorado. Mientras redacto este artículo, contemplo un par de chavales fumándose un porro a escasos metros de la ventana de mi despacho y poco más de una manzana del instituto del barrio. Comenzaron a eso de las 9 de la mañana, la hora de entrar a clase.

Exagerar los peligros del cannabis (daño cerebral, adicción o psicosis) no ha servido de nada. Cualquier pretensión de disuadir a los jóvenes desatará irremediablemente su escepticismo instintivo. Y los riesgos no son lo bastante horripilantes.

Sabemos que estar colocado altera la atención, la memoria y el aprendizaje. Algunas de las variedades de marihuana pueden postrarnos físicamente y causar delirios. Pero no está tan claro si provocan de veras daños permanentes en el cerebro.

Numerosos estudios han constatado que los adultos no consumidores superan a los fumadores crónicos de marihuana en los test de atención, memoria, habilidades motoras y verbales. Pero ello podría explicarse en parte por la persistencia de trazas del cannabis en el cuerpo o los efectos de la abstinencia desatados por la interrupción del consumo durante la participación en el estudio. En un hallazgo esperanzador, un metanálisis de 2012 comprobó que los participantes que habían dejado de fumar «maría» por lo menos durante 25 días no mostraban resultados distintos en los test cognitivos respecto a los no consumidores.

Pero los especialistas no expresan tanto optimismo en el caso la adolescencia. En esta etapa el cerebro madura de diversos modos que mejorarían su eficiencia y reforzarían funciones como el autocontrol emocional. Varios estudios insinúan que el cannabis puede alterar esos procesos.

Por un lado, algunos trabajos recientes evidencian que los cannabinoides sintetizados por nuestras neuronas desempeñan un papel crucial en la formación del entramado de conexiones neuronales, tanto antes de nacer como durante la adolescencia. A lo largo de la vida, dichas moléculas regulan el apetito, el sueño, el estado emocional, la memoria y el movimiento, todo lo cual encaja cuando uno piensa en los efectos de la marihuana.

Durante la adolescencia se suceden cambios enormes en la concentración de tales endocannabinoides, según la neuróloga Yasmin Hurd, de la Escuela Icahn de Medicina en el Monte Sinaí, razón por la que a ella y a tantos otros que estudian este sistema les preocupan las consecuencias del consumo despreocupado de la maría.



CELIA KRAMPIEN

Los estudios de neuroimagen parecen confirmar esa inquietud. Algunos han detectado cambios en el cerebro de los consumidores habituales, como la alteración de la conectividad entre los hemisferios, el procesamiento cognitivo ineficiente en los adolescentes, así como la atrofia de la amígdala y del hipocampo, regiones implicadas en la regulación emocional y en la memoria, respectivamente.

Los estudios en animales aportan más pruebas. Las ratas que reciben tetrahidrocannabinol (THC), sustancia responsable de los efectos psicoactivos de la marihuana, experimentan dificultades cognitivas persistentes si se las expone a ella durante la pubertad, no así en la edad adulta.

Pero el argumento de los daños permanentes no es irrefutable. Los estudios en ratas suelen usar unas dosis tan altas de THC que ni siquiera un consumidor empedernido podría alcanzar; y la adolescencia de los roedores, de apenas un par de semanas, no se parece nada a la nuestra. En los estudios de neuroimagen, las muestras son pequeñas y la causalidad incierta. Además, resulta difícil desligar los resultados de otros factores, como la pobreza, los abusos y el abandono en la infancia, que también dejan su huella en la anatomía cerebral y que se asocian al consumo de otras sustancias, señala Nora Volkow, autora principal de una excelente revisión sobre el cannabis publicada en 2016 en *JAMA Psychiatry*.

Para resolver la incógnita, será preciso examinar a los niños desde la infancia hasta el inicio de la edad adulta. El estudio *Adolescent Brain Cognitive Development,* de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., debería colmar ese vacío. El proyecto, de diez años de duración, examinará 10.000 niños desde los nueve o diez años y recabará datos de neuroimágenes, pruebas genéticas y psicológicas, expedientes académicos y encuestas. Entre otros aspectos, debería contribuir a dilucidar el posible papel de la marihuana en la aparición de la esquizofrenia en algunas personas.

Pero aunque al final resulte que la maría no supone un peligro directo para la mayoría de los adolescentes, difícilmente será benigna. Si, como los jóvenes que contemplo desde mi ventana, faltan con frecuencia a clase, probablemente no recibirán los estímulos intelectuales y sociales para los que su cerebro está preparado. Volkow subraya que la adolescencia es el período «en el que se maximiza nuestra capacidad para explorar las situaciones complejas», en el que se adquiere la capacidad intelectual. Por norma general, los jóvenes que caen en ese tipo de actividades consiguen menos en la vida y son más infelices. Algo que debería importarle a cualquier adolescente.

**Judith Rainhorn** es profesora de historia contemporánea en la Universidad de París 1 Panteón-Sorbona e investigadora del Centro de Historia Social del siglo xx, centro mixto de esa universidad y el CNRS.

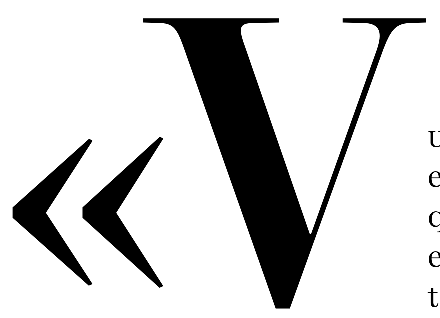


HISTORIA DE LA CIENCIA

# LA TARDÍA PROHIBICIÓN DE LA CERUSA

En el siglo XIX ya no se dudaba de la toxicidad de este pigmento, muy empleado en la pintura de paredes. ¿Por qué, entonces, siguió siendo legal en Europa hasta 1993?

*Judith Rainhorn*



«VUESTRA CERUSA DISTA MUCHO DE SER UNA SAL INOCUA: endurece los huesos, corrompe la sangre. ¿Cómo queréis que no nos afecte cuando sus fluidos se esparcen hasta los cielos? ¡Cuántas personas de treinta años se han vuelto ya ancianos por haber respirado el veneno blanco que va volando por el aire, con el aliento y la palabra!» Así denunciaba el poeta y periodista Clovis Hugues en 1906, en un largo poema titulado *L'empoisonné* («El envenenado»), los estragos de ese pigmento blanco a base de plomo que en el siglo XIX se había convertido en el compuesto principal de todas las pinturas que cubrían los edificios de una Europa que se iba urbanizando a gran velocidad. El poeta tenía buenas razones para su denuncia, puesto que, por entonces, el producto se había identificado sin lugar a dudas como tóxico.



**YA EN LA ANTIGÜEDAD**, la cerusa se utilizaba en cosmética, tal como demuestra esta vasija de maquillaje con trozos de cerusa hallada en una tumba griega del siglo v antes de nuestra era.

¿Cómo pudo la cerusa disfrutar de tal indulgencia colectiva? Durante más de dos siglos esta sustancia, así como su fabricación y su uso, dio lugar a miles de páginas de controversias científicas y técnicas, a jornadas enteras de debates parlamentarios, a repetidos intentos de regulación y a una movilización internacional a favor de su prohibición. No obstante, no se logró abolir por completo su uso hasta 1993. Lo que contamos a continuación es la historia de este acomodo colectivo y duradero al veneno. Por desgracia, cualquier parecido con situaciones actuales no es pura coincidencia.

DESARROLLO INDUSTRIAL

## La fabricación de la cerusa

**El llamado método holandés** consistía en dejar durante varias semanas láminas de plomo en contacto con vinagre y ácido carbónico producido por estiércol de caballo, en miles de recipientes de gres cerrados, tal como se ve aquí en una fábrica de Lille. Por el efecto del calor desprendido por los excrementos, el ácido acético oxidaba las láminas, transformando así el plomo en escamas de carbonato de plomo, que se soltaban a mano y se trituraban.



PÁGINA OPUESTA: WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO/BIBI SAINT-POL; COLECCIÓN DE LOS ARCHIVOS DEL DEPARTAMENTO DEL NORTE DE FRANCIA - 13 FI 1/287 (*fábrica*)

### ORÍGENES Y DIFUSIÓN DE LA CERUSA

La cerusa no es un producto como los otros. En el siglo IV a.C., el botánico griego Teofrasto, en su tratado *Sobre las piedras*, y después en el siglo I, Plinio el Viejo, en su *Historia natural*, ya describían la receta de su fabricación: cuando se sumergen placas de plomo en vinagre, estas se oxidan y producen escamas de carbonato de plomo ($PbCO_3$) que pueden convertirse fácilmente en un fino polvo blanco. Desde la Antigüedad, este polvo se utilizaba en farmacia y en cosmética para ungüentos, maquillaje y pociones. En el Renacimiento era uno de los productos de exportación de lujo que, junto al vidrio, los espejos y las pieles, aseguraban la dominación comercial de Venecia sobre Europa.

En la Holanda de mediados del siglo XVIII se industrializó su proceso de fabricación, tanto en términos de organización del trabajo como de cantidades producidas. Lo que pronto se llamó el método holandés no era más que un ingenioso perfeccionamiento del método antiguo, con el fin de incrementar el rendimiento y de rentabilizar el espacio ocupado. De esta manera, en Ámsterdam, Róterdam o Utrecht se sustituyeron las placas de plomo por espirales del mismo metal, con lo que se ofrecía una mayor superficie de oxidación. Estas espirales se depositaban en crisoles de barro, y miles de estos pequeños recipientes se colocaban sobre un lecho de estiércol de caballo, cuyo calor templado aceleraba la oxidación del metal. Se dejaban reposar ahí de seis a ocho semanas. La eficacia de este método le aseguró una rápida supremacía. Fue adoptado por la mayor parte de los fabricantes ingleses y franceses desde principios del siglo XIX.

Gracias a sus cualidades técnicas (en particular su gran opacidad, su buena capacidad de recubrimiento, su rapidez de secado y su resistencia a la intemperie), la cerusa era apreciada desde épocas remotas por los artistas pintores que la usaban como materia prima de muchos colores y como adherente en sus lienzos. Más tarde se impuso también como el pigmento blanco más empleado en el continente europeo para la pintura de edificios, navíos, coches de caballos y, más adelante, de vagones de tren.

Después de Holanda, la producción se extendió a Inglaterra y Bélgica en la década de 1800, y después, durante la década de 1820, a Francia, Alemania y Estados Unidos. Se fabricaba al ritmo de una revolución urbana que exigía cada vez más materiales de construcción, a medida que Europa, y después América del Norte, veían aumentar la influencia de las ciudades. A mediados del siglo XIX Francia contaba con una docena de fábricas de cerusa, que empleaban en total a entre 500 y 1000 obreros.

### LOS ATROCES «CÓLICOS DE PLOMO»

Aquí reside la paradoja inicial de la historia de la cerusa. Por un lado, su fabricación se llevó a cabo a gran escala, la conquista de los mercados de consumo se extendió al conjunto del continente europeo y los usos del producto abarcaron a partir de entonces numerosos sectores de la economía artesanal e industrial: la pintura, en un noventa por cien, pero también el vidriado de porcelana y de cerámica, el blanqueamiento de encajes, el alisado de papel glasé y de tarjetas de visita, el tinte de la tela encerada de los coches de bebé o la coloración del papel pintado y del papel de colores usado en confitería.

Sin embargo, al mismo tiempo, la toxicidad del producto no planteaba ninguna duda. Conocidos desde el siglo XVII, los efectos deletéreos en la salud de los compuestos de plomo y, en particular, de la cerusa, fueron objeto de denuncias a lo largo de todo el proceso de su desarrollo industrial. En su obra *De morbis artificum diatriba* («Sobre las enfermedades de los artesanos»), publicada en Padua en 1700, el médico italiano Bernardino Ramazzini se conformaba con comentar que «la

EN SÍNTESIS

**En el siglo XIX,** la cerusa, albayalde o blanco de plomo, era el pigmento blanco más utilizado en Europa para la pintura de edificios.

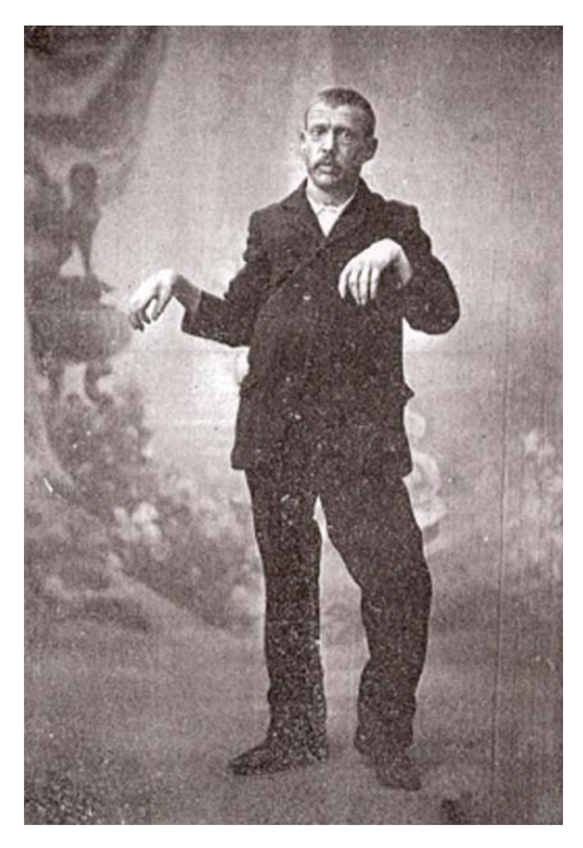
**Sin embargo,** desde el siglo XVII se sabía que se trataba de un producto nocivo, responsable de una intoxicación que podía llegar a ser muy grave: el saturnismo.

**Aunque ya existía** un sustitutivo inocuo, el blanco de cinc, se creó un grupo de presión en el seno de la industria de la cerusa. Estaba muy bien organizado y multiplicó las medidas para mantener el producto en el mercado, mientras sembraba la duda sobre la toxicidad del blanco de plomo.

causa principal de enfermedad de los pintores es el material de los colores que utilizan, que siempre tienen entre las manos y bajo la nariz». No obstante, a partir de los años veinte del siglo XIX, la denuncia de los peligros del «veneno blanco» se convirtió en tema recurrente de la bibliografía médica e higienista.

Los obreros de la cerusa, que fabricaban el compuesto tóxico y se movían entre nubes continuas de polvo de plomo, y los pintores de brocha gorda, que utilizaban el polvo blanco para preparar los colores, se consideraron las principales víctimas de una epidemia de saturnismo cuyas dimensiones eran difíciles de definir con precisión. Absorbido principalmente por vía digestiva y respiratoria, el plomo ataca sobre todo a los sistemas nerviosos central y periférico y a los riñones. Los síntomas más conocidos y evidentes son los «cólicos de plomo», caracterizados por atroces dolores de abdomen. En un estadio más avanzado de la enfermedad, se adquiere la postura característica de cangrejo, resultado del daño en los músculos extensores.

Si la irrupción de esa realidad patológica se percibió con gran alarma en aquella época fue porque hasta entonces había pasado inadvertida debido a su escasa prevalencia y, muy especialmente, por la ausencia de instrumentos para su evaluación. La enfermedad y sus causas no fueron claramente definidas por los médicos hasta después de los años treinta del siglo XIX. Mucho más tardía fue la estimación en términos estadísticos de su impacto sobre la salud.



LOS ESTRAGOS DE LA CERUSA: La intoxicación por plomo, llamada saturnismo, provoca dolores abdominales agudos y problemas neurológicos graves que pueden conllevar la parálisis de miembros, como en el caso de este pintor de Saint-Quentin, en Aisne. Puede resultar mortal.

A mediados del siglo XIX, las críticas a la cerusa adquirieron una nueva dimensión. La militancia higienista dejó paso a una controversia en la que se entremezclaban ingredientes científicos, económicos, políticos y sanitarios. El debate se originó por la aparición de un producto de sustitución inofensivo, el «blanco de cinc» (óxido de cinc, ZnO), que propició un giro de los acontecimientos y puso al blanco de plomo en peligro. El crucial hallazgo fue obra de Jean-Edme Leclaire, un empresario de pintura de París.

Leclaire había sido pintor de paredes y simpatizaba con el sansimonismo, una corriente intelectual que preconizaba una nueva organización más fraternal de la sociedad. Fue testigo de la revuelta silenciosa ocurrida en las fábricas de cerusa parisinas, cuando los obreros abandonaron el taller y escribieron en la puerta la palabra «MATADERO». Leclaire se las ingenió para encontrar un sustitutivo inocuo para la peligrosa cerusa. En 1845 desarrolló un proceso de fabricación industrial del blanco de cinc con todas las cualidades de inocuidad deseadas, tanto para los trabajadores como para los usuarios. El nuevo producto se conocía desde finales del siglo XVIII, pero no podía competir con la cerusa debido a su precio prohibitivo. Gracias al procedimiento de Leclaire, el blanco de cinc pudo medirse con ella en su mismo terreno.

Leclaire consiguió asociarse con la Sociedad de Minas y Fundiciones de la Vieille-Montagne, una multinacional de Lieja que se hallaba al frente de la metalurgia mundial del cinc y que disponía de poderosos establecimientos de producción y redes de comercialización. Con esta ayuda, Leclaire pudo lanzar al mercado europeo una innovación científica e industrial capaz de competir con la secular cerusa. En el contexto de la pintura para edificios, «constituyó una revolución en los hábitos de trabajo que dio lugar a dos grupos diferenciados: por un lado, los que utilizaban el veneno, atados a la vieja rutina, con obreros delgados, pálidos y consumidos por la enfermedad; por otro, los partidarios del blanco de cinc, al mando de una plantilla de hombres sanos y robustos, con buen color de cara y aire triunfante», según describía el escritor Charles Robert en una biografía de Leclaire publicada en 1879.

En 1849, Leclaire fue recompensado con una medalla de oro por la Sociedad de Apoyo a la Industria Nacional y, en 1850, recibió el premio Montyon de la Academia de Ciencias y la Legión de Honor. Una decisión pública voluntarista acompañó a esta lluvia de recompensas: desde agosto de 1849, un decreto del ministro de Obras Públicas de la Segunda República ordenó la utilización del blanco de cinc para el conjunto de los trabajos efectuados en los edificios públicos, con el único argumento de proteger la salud de los trabajadores.

### UNA LEY QUE PASÓ INADVERTIDA

De esta manera, a mitad de siglo todo hacía pensar que no se tardaría en abandonar la cerusa para dar paso al auge del blanco de cinc. Sin embargo, hasta la mitad del siglo XX, el segundo apenas puso en riesgo la posición dominante de la primera en el mercado de la pintura y de la construcción. Hizo falta esperar medio siglo, hasta alrededor de 1900, para que se recordara de nuevo la toxicidad de la cerusa en la esfera pública: sindicalistas, políticos de primer orden, como René Viviani o Georges Clemenceau, funcionarios ministeriales preocupados por la seguridad laboral, parlamentarios y expertos en salud pública. Todos ellos aunaron esfuerzos para erigir esta cuestión lacerante en una causa política y social de primer orden.

En 1909, tras ásperos debates y largos entresijos parlamentarios, se votó una tímida ley para prohibir parcialmente el uso de la cerusa en la mayoría de los trabajos de pintura para edificios. Sin embargo, la ley quedó en agua de borrajas debido al inicio de la guerra. La cuestión reapareció a principios de los años veinte, en el marco de la Organización Internacional del

JUDITH RAINHORN

Trabajo (OIT). Esta institución buscaba establecer una legislación social a escala mundial, considerada como una obra de paz. Sin embargo, la decimotercera convención internacional, adoptada por la OIT en 1921, fue aún más tímida que la ley francesa: solamente prohibió el uso de la cerusa en determinados trabajos de pintura.

¿Por qué y cómo consiguió la industria de la cerusa mantener su supremacía en el mercado de la pintura en detrimento del blanco de cinc hasta el período de entreguerras, cuando médicos, higienistas, obreros y poderes públicos denunciaban su carácter nocivo? ¿Cómo explicar que la mayoría de los protagonistas relegaran a un segundo plano las preocupaciones sanitarias? Así lo hicieron los poderes públicos, los responsables del fomento de la industria y la inmensa parte de los fabricantes y usuarios de la pintura.

Para comprender la cronología de esa trayectoria de idas y venidas y la amnesia periódica que parece afectar a los participantes en los envenenamientos industriales, hace falta tener en cuenta tanto los vacíos del conocimiento (es decir, la construcción política y social de la ignorancia) como las condiciones de formulación de los problemas públicos. En efecto, cada resurgimiento de la cuestión parecía exhumarla y recolocarla en un terreno virgen, como si no hubiera habido ninguna acumulación de saberes científicos y técnicos recopilados en los episodios precedentes. Parecía necesario convocar una y otra vez a químicos y médicos para demostrar de nuevo la peligrosidad del producto, o volver a escuchar a los expertos en pintura defender que el blanco de cinc podía reemplazar y mejorar el blanco de plomo. Se podría decir que cada resurgimiento del problema provocaba una nueva movilización de las tropas alrededor de la causa. De este modo, se produjo una vacilación constante en la argumentación. Varios factores permiten comprender la relativa invisibilidad de la cuestión en el debate público durante al menos un siglo y medio.

### UN GRUPO DE PRESIÓN MUY ORGANIZADO

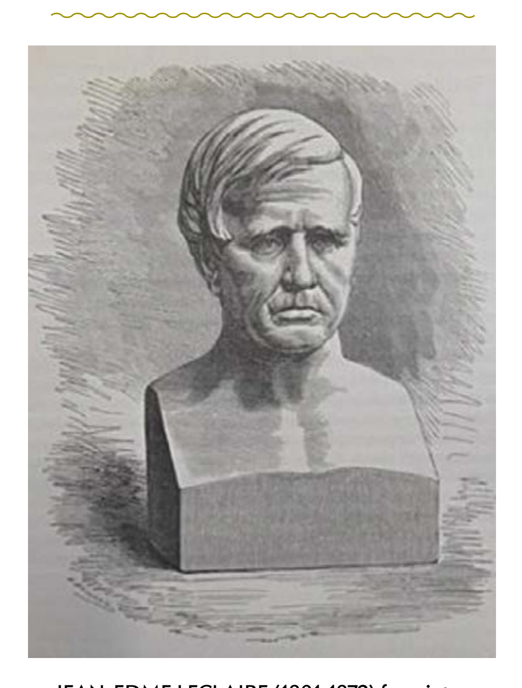
En primer lugar, hasta mediados del siglo XIX, el discurso que denunciaba la peligrosidad del producto permaneció confinado a las estrechas esferas del higienismo y de la medicina, sin llegar a franquear las fronteras de este terreno especializado. El saturnismo fue objeto de investigaciones importantes que comenzaron en los años treinta y se multiplicaron a partir de 1870. Después de la obra fundamental del médico Louis Tanquerel des Planches dedicada a las enfermedades del plomo o saturninas (*Traité des maladies de plomb ou saturnines*), publicada en 1839, hubo que esperar hasta el último cuarto del siglo XIX para que se establecieran los saberes médicos sobre la intoxicación por plomo. Sin embargo, a causa de su carácter técnico, el discurso clínico y las controversias médicas trascendieron muy poco fuera del medio hospitalario, lo que contribuyó a la invisibilidad del problema en la esfera pública. El saber médico sobre el saturnismo laboral no se difundió antes de principios del siglo XX, cuando medicina y política entraron en resonancia a través de las redes republicanas y masónicas, gracias sobre todo a personalidades como Paul Brouardel, seguidor de Pasteur, profesor de medicina legal, miembro de la Academia de Medicina y decano de la Facultad de Medicina de París.

En segundo lugar, bajo los Gobiernos de Louis Napoléon, se constituyó un poderoso grupo de presión en el seno de la industria de la cerusa. Aunque es muy difícil conocer la naturaleza y la constitución de las redes conformadas, la coalición era ya suficientemente activa a mediados del siglo XIX como para contrarrestar la ofensiva prohibicionista. Los empresarios franceses de la cerusa no eran muy numerosos, pero estaban bien estructurados geográficamente a través de redes económicas que reforzaban los vínculos familiares, en particular con la poderosa industria textil del norte. También estaban sólidamente organizados para influir en protagonistas cruciales en la toma de decisiones, entre ellos las Cámaras de Comercio y de Industria. Conjugando todos estos medios de presión, los fabricantes multiplicaron las acciones para mantener la preeminencia de su producto en un mercado cada vez más internacionalizado y liberalizado.

Charles Expert-Bezançon fue un destacado fabricante de cerusa parisino que promocionó esta industria hasta las más altas esferas del Estado. Recorriendo exposiciones universales y multiplicando medallas y premios a la industria, que enarbolaban con orgullo en los membretes de sus cartas, los fabricantes de cerusa se dedicaron a sembrar dudas sobre la supuesta toxicidad del blanco de plomo en numerosas publicaciones e intervenciones públicas. Insistían en las precauciones «deseables» respecto a su uso y culpabilizaban a los obreros por su comportamiento negligente y su desatención frente a estas prevenciones. Con frecuencia también esgrimieron en su defensa los esfuerzos incontestables de mejora técnica que la industria de cerusa había emprendido desde mediados del siglo XIX. Consideraban estas mejoras como pruebas irrefutables de la voluntad de los empresarios para mejorar el entorno laboral. Con estos argumentos bajo el brazo, los productores se dedicaron a sembrar dudas sobre la peligrosidad de su industria.

Otra causa fundamental del inmovilismo en el empleo de la cerusa fue el debate técnico sobre el valor intrínseco de los productos comerciales. Ante la voluntad del Estado de prohibir su uso (o, al menos, regularlo), los empresarios proclamaron su credo antiintervencionista con argumentos como el

**Gracias al método de Leclaire, el blanco de cinc pudo competir con la cerusa**



JEAN-EDME LECLAIRE (1801-1872) fue pintor de paredes y después empresario. Preocupado por la salud de los obreros, puso en marcha un procedimiento para fabricar blanco de cinc, un producto no tóxico.

## Los peligros del plomo en España

### Los intentos históricos de legislar su uso dejan entrever los conflictos entre los intereses económicos y la salud pública

*JOSÉ RAMÓN BERTOMEU SÁNCHEZ*

**A finales de 1800,** la muerte repentina en Madrid de la marquesa de la Merced, mujer del embajador en Roma, Antonio Vargas y Laguna, desencadenó una serie de pesquisas por parte del Consejo de Castilla, con la participación de los más famosos médicos de la Corte. Este incidente acabaría produciendo la más importante legislación del Antiguo Régimen en torno a los peligros del plomo. Los peritos concluyeron que el accidente fue debido al consumo de alimentos almacenados en vasijas de barro vidriado con plomo. Siguiendo sus informes, y ampliando el abanico de casos peligrosos, el Consejo de Castilla promulgó en 1801 una Real Cédula destinada a «evitar los perjuicios que causan a la salud las vasijas de cobre, el plomo que contienen los estañados, las de estaño que tienen mezcla de plomo y los malos vidriados de las de barro». La reglamentación fue inspirada por las investigaciones realizadas en la década de 1790 en la Academia de Medicina de Madrid por el médico Ignacio Ruiz de Luzuriaga, autor de un estudio detallado sobre los cólicos de Madrid.

En los años siguientes surgieron nuevas propuestas elaboradas por químicos famosos residentes en Madrid. Pedro Gutiérrez Bueno, profesor de química del Colegio de Cirugía, abogó por un uso temprano del cinc como sustitutivo del plomo, pero problemas semejantes a los descritos por Judith Rainhorn (*véase el artículo principal*) impidieron el desarrollo de la propuesta. Por su parte, el químico francés Louis Proust, por entonces director del Laboratorio Real de Madrid, adoptó las tendencias francesas de esos años y, en un largo informe de 1803, minimizó los peligros de la intoxicación mediante experimentos realizados en su laboratorio de Madrid. Proust desdeñó la propuesta de Gutiérrez Bueno por considerarla inviable, tanto técnica como económicamente, y sugirió seguir empleando los compuestos de plomo, aunque con ciertas precauciones.

La propuesta más innovadora y ambiciosa de los primeros años del siglo XIX fue realizada por un alfarero de Madrid, Esteban de Cantelar. Sugirió un nuevo tipo de vidriado con más plomo, pero más seguro debido a las técnicas de producción, e imaginó una nueva manufactura real para producirlo y comercializarlo. En su propuesta, que implicaba más consumo de compuestos de plomo en alfarería, Cantelar tuvo siempre presente los grandes beneficios que la minería del plomo y la venta de sus productos producía para la Corona española. Este asunto provocaba, según supo también señalar Ruiz de Luzuriaga, una tensión entre los intereses económicos del Estado y la salud pública. El conflicto de intereses explica las pocas aplicaciones conocidas de la Real Cédula a lo largo del siglo XIX y la ausencia de reglamentos posteriores que la hicieran más efectiva. Los cólicos saturninos siguieron siendo comunes durante décadas y también se produjeron frecuentes casos de intoxicación debido a la adulteración de alimentos con compuestos de plomo.

En 1908 se prohibió el trabajo de mujeres y niños en industrias peligrosas, incluida la de producción de cerusa. En 1924, España ratificó el convenio adoptado en 1921 por la III Conferencia Internacional del Trabajo sobre prohibición de la cerusa en la pintura. España era entonces uno de los principales países productores de plomo, por lo que se retrasó la aplicación del convenio durante los años de la dictadura de Primo de Rivera. Un decreto de 1926 anunció que la prohibición debía comenzar en noviembre de 1928, tras un reglamento que debía recoger las excepciones y que no llegó a publicarse. La normativa fue una de las primeras medidas adoptadas por el Gobierno provisional de la Segunda República en mayo de 1931, cuando el socialista Francisco Largo Caballero era ministro

que sigue, recogido por el diputado Jules-Louis Breton en 1903 en un informe de investigación realizado para preparar la futura ley sobre la cerusa: «La inauguración del ferrocarril supuso la supresión de las diligencias, que murieron por causas naturales. Si el blanco de cinc tiene una superioridad real sobre el blanco de cerusa, nos hará morir comercialmente, pero que el Estado no intervenga en absoluto». En otras palabras, los empresarios defendían una posición económica liberal, según la cual las leyes del mercado debían autorregularse conforme a las leyes de la competencia, las únicas capaces de determinar cuál de los dos pigmentos debía dominar el mercado de la pintura.

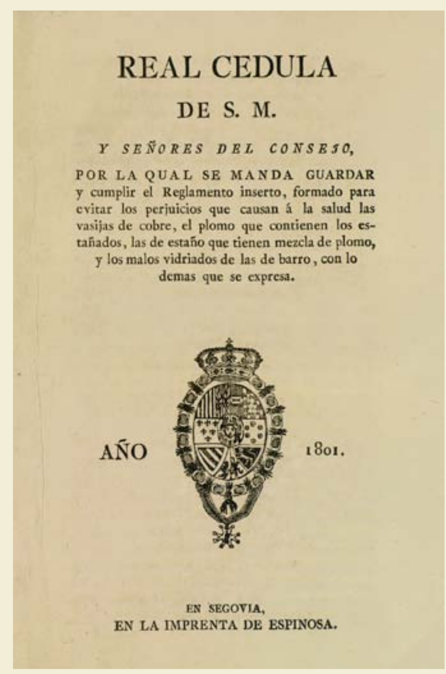
Otro aspecto del problema fue el conservadurismo de los mismos vendedores de pinturas y de los pintores de brocha gorda respecto al veneno. La pintura con blanco de cinc era más difícil de manipular que la del blanco de plomo, y obligaba al obrero a prestar más atención a la hora de homogeneizarla. Hacía falta cierto entrenamiento y pericia, lo que explica en parte la hostilidad al cambio de numerosos pintores apegados a las rutinas de su oficio.

Finalmente, es necesario traer también a colación la falta de estructuración del incipiente movimiento obrero como otra causa más de la ocultación global del problema sanitario ligado a los venenos industriales. No existió ninguna organización sindical que reuniera a los obreros de la cerusa. Se debió esperar hasta los primeros años del siglo XX, con la aparición de una organización profesional del gremio de pintores de brocha gorda, para que el envenenamiento por plomo se erigiera en una reivindicación de los discursos sindicales, aunque siempre de forma menor.

Tras la prohibición parcial de 1909, y la ratificación por parte de Francia de la convención internacional adoptada por la OIT en 1926, se podría pensar que la cerusa iba a desaparecer. Pero no fue así, según dejan constancia las normas de 1930, 1934 y 1948. Reiterando las precedentes, estas regulaciones proscribieron de nuevo el uso de la cerusa en la pintura de edificios. Tendría que llegar el año 1993, cuando un decreto prohibió la venta de pintura con cerusa, para que Francia se situase conforme a la reciente reglamentación europea.

de Trabajo. Se prohibió el empleo de la cerusa y otros compuestos de plomo en los trabajos de pintura interior, aunque con numerosas excepciones: la pintura decorativa, las estaciones de ferrocarril, los establecimientos industriales autorizados y las situaciones en que concurrieran «circunstancias especiales apreciadas concretamente en cada caso» y autorizados por el ministerio. Se establecían también en esta norma republicana toda una serie de medidas preventivas en los lugares de trabajo y se obligaba a realizar un seguimiento de las posibles intoxicaciones. La gran cantidad de excepciones, sin embargo, permitió un uso discrecional de la norma y unas consecuencias limitadas en su aplicación.

Un informe de 1981, realizado por un conjunto de expertos médicos, toxicólogos e inspectores de trabajo, afirmaba que la intoxicación crónica por el plomo seguía siendo «un problema muy importante» en España, a pesar de que los exámenes médicos periódicos y las medidas de higiene laboral habían conseguido evitar los casos más graves. A pesar de ello, a principios de la década de 1980, se diagnosticaban más de 500 casos anuales de intoxicación por plomo, principalmente en fábricas de cerámica, baterías y aceros. Los expertos de esos años también denunciaron el «estado obsoleto de la legislación sobre saturnismo en España» que, en esos momentos, estaba basado en un Real Decreto de 1978, en el que se actualizaba el cuadro de enfermedades profesionales establecido en los años sesenta por la Seguridad Social. La lista fue nuevamente adaptada a la normativa europea en 2006. También se actualizó en 2015 la legislación sobre protección contra agentes químicos en el trabajo, con los protocolos del registro europeo REACH.


REAL CEDULA

DE S. M.

Y SEÑORES DEL CONSEJO,

POR LA QUAL SE MANDA GUARDAR y cumplir el Reglamento inserto, formado para evitar los perjuicios que causan á la salud las vasijas de cobre, el plomo que contienen los estañados, las de estaño que tienen mezcla de plomo, y los malos vidriados de las de barro, con lo demas que se expresa.

AÑO 1801.

EN SEGOVIA, EN LA IMPRENTA DE ESPINOSA.

La Real Cédula de 1801 se distribuyó y se mandó imprimir en todas las grandes ciudades. Aquí se reproduce un ejemplar impreso en Segovia, que puede consultarse completo en la Biblioteca digital de la Universidad Autónoma de Barcelona (https://ddd.uab.cat/record/61918).



Los expertos de los años ochenta también apuntaban otro de los graves problemas para controlar las intoxicaciones saturninas: las dificultades para detectar y contrarrestar la exposición crónica a bajas dosis, con síntomas clínicos poco evidentes, tales como anemias moderadas, cambios de comportamiento, déficits sensoriales y alteraciones urinarias, así como nefritis que podían ser letales incluso muchos años después de la exposición.

Los nuevos usos del plomo desarrollados durante el siglo XX (por ejemplo, en las gasolinas) provocaron nuevos riesgos para la salud pública y el ambiente, para los que ha sido necesario desarrollar normativas particulares (directiva 98/70/CE), a las que la legislación española se adaptó de forma tardía, gracias la obtención de una moratoria que permitió extender la venta de gasolina con plomo hasta 2002. De nuevo, las tensiones entre intereses económicos y salud pública parecen haber desempeñado su papel.

A escala mundial, la intoxicación por plomo sigue siendo un grave problema. Según la OMS, la exposición al plomo provocó medio millón de muertes en 2015 y fue la causa de un número todavía mayor de enfermedades cardiovasculares y serios problemas para el desarrollo mental infantil.

***José Ramón Bertomeu Sánchez*** *es director del Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero de la Universidad de Valencia.*

### VENENOS DE AYER Y DE HOY

La historia de la larga controversia entre el uso del blanco de plomo y el blanco de cinc en la pintura de edificios ilustra la poderosa interconexión de factores económicos, sociales, técnicos y políticos en la cuestión del riesgo industrial durante los siglos XIX y XX. Objeto de investigación científica, debates técnicos, rivalidades económicas y peleas políticas, la cerusa representa un laboratorio privilegiado para observar la difusión y la ocultación de discursos sobre riesgo industrial y, por lo tanto, para analizar el proceso histórico de fabricación de un veneno industrial.

Desde distintas perspectivas, al tirar del hilo de Ariadna de la cerusa a través del laberinto de la historia, se crea una forma de reflexionar sobre las relaciones complejas, y a menudo ambiguas, que mantienen nuestras sociedades contemporáneas con sus venenos. El amianto, la industria nuclear, las nanopartículas, los plaguicidas agrícolas, las partículas finas en suspensión en la atmósfera de las grandes ciudades y otras diversas formas de contaminación son ejemplos contemporáneos de una larga historia de acomodo de los seres humanos a los venenos que ellos mismos producen.



PARA SABER MÁS

**Biographie d'un homme utile: Leclaire, peintre en bâtiments.** C.-F. Robert. Sandoz et Fischbacher, 1879.

**Agnotology: The making and unmaking of ignorance.** R. Proctor et al. Stanford University Press, 2008.

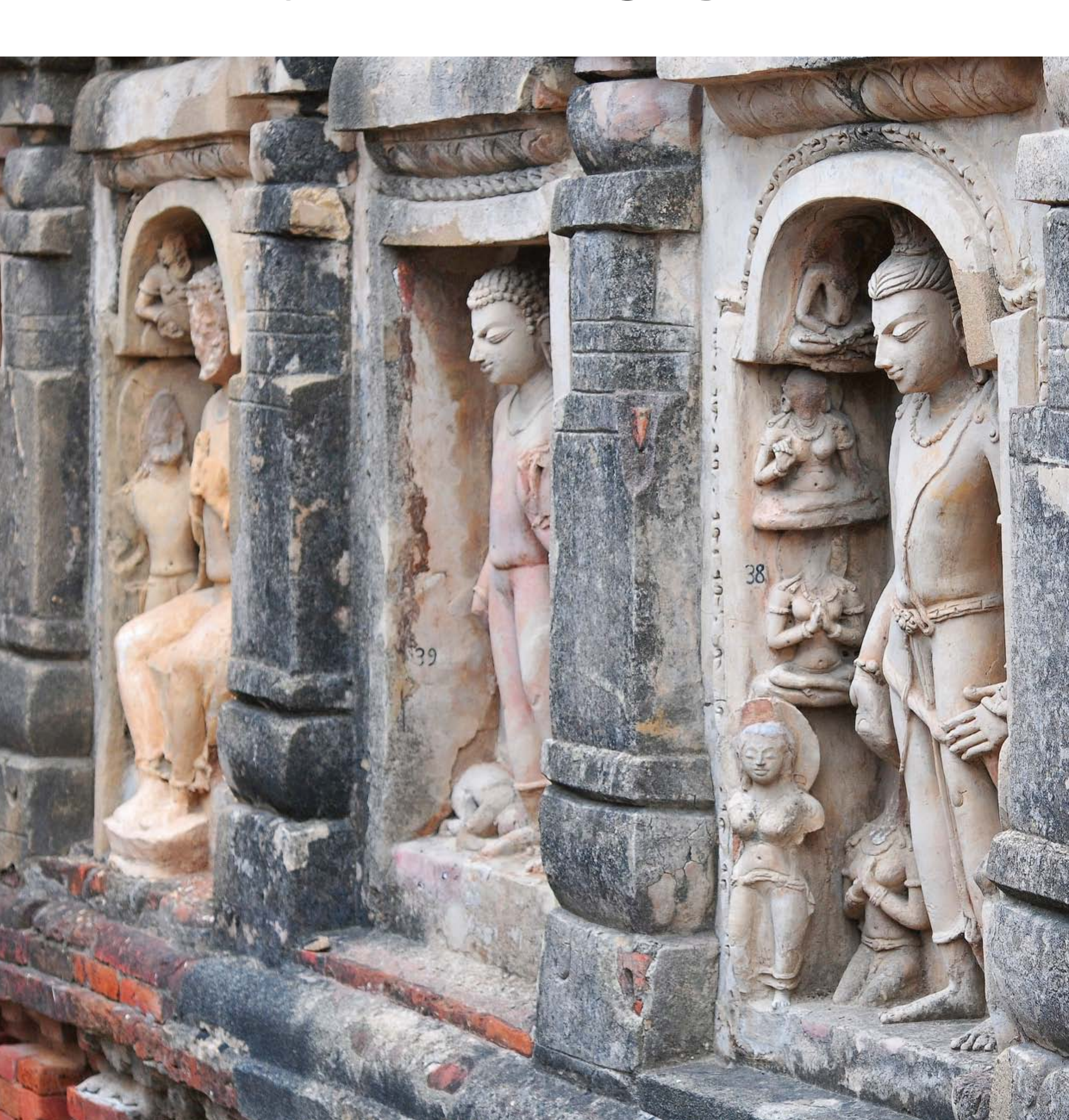
**Poussières de plomb en pollution de l'air au travail: La céruse en question sur le temps long (France, XIX$^{e}$-XX$^{e}$ siècles).** J. Rainhorm en *Pollution atmosphérique*, n.º 222, 2014.

El próximo 14 de febrero Judith Rainhorn ofrecerá una conferencia sobre la historia de la prohibición de la cerusa en el Instituto de Historia de la Medicina y la Ciencia López Piñero (más información en nuestra Agenda).

EN NUESTRO ARCHIVO

**Reconsideración del amianto.** James E. Alleman y Brooke T. Mossman en *IyC*, septiembre de 1997.

# NALANDA, LA UNIV MÁS ANTIGUA DEL



# ERSIDAD MUNDO

Erigido entre los siglos IV y V de nuestra era, el complejo budista de Nalanda, en la India, fue un bastión de sabiduría más allá de la religión

*Max Deeg*




ARTÍSTICAS REPRESENTACIONES DE BUDA esculpidas en estuco adornan aún hoy un muro del templo número 3 de Nalanda (*izquierda*). Este centro de estudios del budismo temprano, situado en el actual estado indio de Bihar, se encontraba cerca de importantes lugares religiosos, como Bodhgaya.

CORTESÍA DEL CENTRO DEL PATRIMONIO MUNDIAL DE LA UNESCO/RAJNEESH RAJ (*esculturas de Buda*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*/EMDE-GRAFIK (*mapa*)

NUEVA SERIE SOBRE ARQUEOLOGÍA

**LUGARES DE CULTO**

**PARTE 1**
**NALANDA (BUDISMO)**
***Max Deeg***

PARTE 2
GÖBEKLI TEPE (NEOLÍTICO)
*Marion Benz*

PARTE 3
TÚMULO FUNERARIO DE ANTÍOCO I (HELENISMO)
*Jörg Wagner*

PARTE 4
CATEDRALES
*Matthias Untermann*

**Max Deeg** es historiador de las religiones y profesor de estudios budistas en la Universidad de Cardiff, así como investigador invitado en el Colegio Käte Hamburger de la Universidad de Bochum. Es especialista en la difusión del budismo en Asia.



Durante siglos, nadie sospechó que las ruinas situadas en el estado indio de Bihar escondían la escuela más antigua del budismo: Nalanda. En la primera mitad del siglo XIX, los arqueólogos británicos aficionados Francis Buchanan-Hamilton y Markham Kittoe investigaron los restos y los calificaron lapidariamente de colina. Sin embargo, Nalanda, cuyos orígenes se remontan al siglo IV o V de nuestra era, fue sede de una de las más célebres escuelas religiosas del budismo. Los expertos le reconocen el rango de universidad, tanto por la monumentalidad y la exquisita arquitectura del recinto como por el extenso currículo que allí se impartía y la repercusión que ejerció en el exterior. A Nalanda acudían estudiantes de toda Asia, que, luego, difundían en sus países de origen las enseñanzas y los conocimientos adquiridos.

A tan solo doce kilómetros de las ruinas se levanta hoy la pequeña ciudad de Rajgir, fundada en el siglo V a.C. con el nombre de Rajagriha. En aquel tiempo era la capital del reino de Magadha, cuya área de influencia se correspondía aproximadamente con el actual estado indio de Bihar. Algunos lugares importantes de la biografía de Buda (murió en el año 483 a.C.) se sitúan en Magadha: el Pico del Buitre, donde, según se dice, predicó el fundador del budismo; el monasterio conocido como El Bosque de Bambú, considerado uno de los más antiguos de esta religión; y, sobre todo, Bodhgaya, el legendario lugar donde Buda alcanzó la iluminación. Quienes viajaban entre los centros religiosos y económicos del norte y el sur del reino tenían que pasar necesariamente por Nalanda.

En descargo de Hamilton y Kittoe, cabe señalar que los investigadores europeos de la época aún desconocían fuentes escritas que mencionasen el lugar y su importancia. La situación cambió cuando, en 1853, el sinólogo francés Stanislas Julien tradujo la biografía del monje chino Xuanzang (600/603-664) y, cuatro años más tarde, su libro de viajes. Xuanzang residió en la India entre los años 629 y 645. Visitó diversos lugares sagrados y permaneció varios años en Nalanda, dedicado al estudio de la doctrina y la filosofía budistas. Tras regresar a China, escribió su *Informe del viaje al oeste de la gran dinastía Tang*, en el que describe, entre otros, el «monasterio de Nalantuo», transcripción fonética china de Nalanda. Años más tarde, el monje Huili escribiría una biografía de Xuanzang en la que plasmaría sus vivencias en el monasterio.

## GRANDEZA ARQUITECTÓNICA

Las traducciones de Julien permitieron localizar e identificar algunos centros budistas en el noreste de la India. En 1872, el administrador regional británico A. M. Broadley (1847-1916) relacionó las ruinas con Nalanda y, también por vez primera, calificó el monasterio de «universidad». Con todo, fue Alexander Cunningham (1814-1893), pionero de la arqueología india, quien comenzó a estudiar la zona con el debido rigor. En su calidad de ingeniero del Ejército británico, Cunningham había recorrido el país y se había interesado por los vestigios del pasado, lo que acabaría convirtiéndolo en el primer director del Servicio Arqueológico de la India. Diversas inscripciones que contenían el nombre del monasterio le ayudaron a documentar la identidad de las ruinas, y otras descubiertas con posterioridad confirmaron su estatus como *mahavihara* («gran monasterio»).

Huili ofrece una descripción del lugar muy clarificadora (cita abreviada): «Los edificios monacales están separados y divididos en ocho complejos. Plataformas suntuosamente decoradas se sitúan una junto a otra como si de estrellas se tratara; magníficos edificios se levantan a modo de cumbres montañosas; los templos infunden respeto envueltos en la bruma. Las celdas de los monjes se encuentran en edificios concebidos como pabellones de cuatro pisos con vigas cumbreras con forma de dragones cornudos, y las vigas del tejado están pintadas en los colores del arcoíris».

Como Xuanzang, otros monjes chinos de finales del siglo VII y del VIII se sintieron también atraídos por la India. Sus relatos

### EN SÍNTESIS

**El monasterio de Nalanda,** en la India, fue fundado entre los siglos IV y V como centro de estudios budistas. De gran importancia, su influencia se extendió hasta China e Indonesia.

**Varios miles de monjes** y laicos estudiaban en él las enseñanzas de Buda y su filosofía, pero también otras asignaturas no teológicas, como lógica, gramática y medicina.

**Nalanda** puede considerarse una universidad en el mismo sentido en que lo eran las madrasas islámicas o las universidades medievales europeas. Hoy, los arqueólogos siguen descubriéndola.

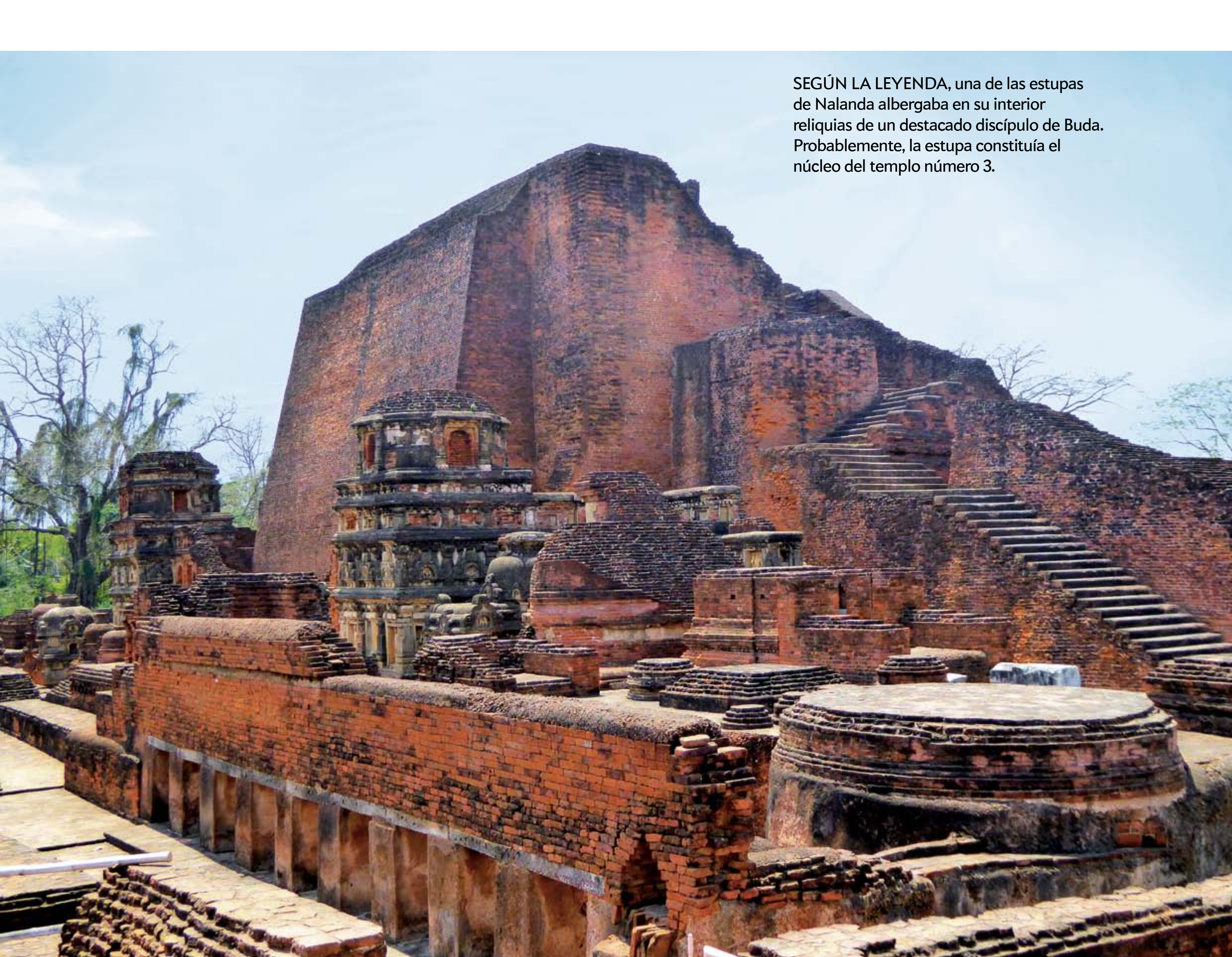
revelan valiosos detalles sobre el monasterio. La descripción más minuciosa se debe a Yi Ching, cuyos pormenores difieren de los presentados por Xuanzang y Huili (cita abreviada): «La forma básica del monasterio es casi cuadrada, con aleros rectos en los cuatro lados que forman corredores techados en todo el perímetro. Las celdas son de ladrillo y los edificios que las albergan tienen tres pisos. Cada uno mide más de un zhang de alto [unos 3,5 metros]; los travesaños están cubiertos con tablas, no hay vigas de techo ni tejas, sino que todo está cubierto con ladrillos. En cada lado hay nueve celdas para los monjes. Las puertas de los edificios monacales están orientadas hacia el oeste; por encima de ellos se yerguen pabellones bellamente diseñados y decorados con adornos exquisitos».

### MUCHO POR DESCUBRIR

Según Yi Ching, en el recinto vivían 3500 monjes y al monasterio pertenecían más de 200 pueblos. Asimismo, menciona la existencia de diez estanques en el interior de la muralla que rodeaba al recinto. En la actualidad hay, de hecho, varios embalses de dimensiones considerables que quizá sean a los que se refería el monje, si bien se encuentran situados fuera de las ruinas investigadas hasta ahora. Las estructuras arquitectónicas y los artefactos hallados fuera de las ruinas confirman asimismo que, en los siglos VII y VIII, el monasterio era bastante mayor de lo que se pensó en su momento.

A partir de prospecciones, hallazgos casuales y los embalses citados, los expertos estiman que la superficie del sitio descrito en las fuentes debía rondar el kilómetro cuadrado. Entre 1915 y 1937, así como entre 1974 y 1983, se excavaron de manera sistemática unas doce hectáreas; es decir, algo más del 10 por ciento. Desde entonces solo se han efectuado excavaciones esporádicas. Hasta hoy se han descubierto once edificios de planta sencilla, similares a los de otros monasterios budistas de la India, y seis grandes templos de ladrillo. Aunque solo quedan ruinas, los detalles arquitectónicos y los fragmentos de la decoración permiten intuir la monumentalidad del complejo. Sin duda, las construcciones debían causar en los visitantes una profunda impresión. Repartidos por el terreno se han descubierto también restos de estupas y chaityas, edificaciones típicas del budismo. Las primeras son de mayor tamaño y a menudo contienen reliquias; las segundas eran sufragadas por los peregrinos.

La mayoría de las fuentes escritas sitúan la fundación de Nalanda en el siglo IV o V, cuando la dinastía Gupta reinaba en el norte de la India. El estrato de excavación más antiguo así lo confirma también. Sin embargo, los hallazgos arqueológicos difieren de las descripciones de los siglos VII y VIII. En sus textos, Xuanzang afirma que los edificios del monasterio formaban un anillo, pero las ruinas (a excepción de las situadas más al sur) se alinean a lo largo de un eje norte-sur.



SEGÚN LA LEYENDA, una de las estupas de Nalanda albergaba en su interior reliquias de un destacado discípulo de Buda. Probablemente, la estupa constituía el núcleo del templo número 3.



NALANDA constaba esencialmente de una serie de edificios monacales y diversos santuarios. Hasta ahora solo se ha excavado una décima parte del recinto.

El número de edificios descubiertos hasta ahora es menor de lo que mencionan las fuentes chinas, donde se habla de siete, ocho o incluso nueve «monasterios». Las escaleras y los orificios de los muros, donde se insertaban las vigas del techo, confirman que tenían dos o más pisos. Probablemente se remontan a fases de construcción posteriores; la datación exacta resulta problemática, ya que las estructuras de diferentes épocas se encuentran mezcladas.

### LA ALEJANDRÍA INDIA

Los textos revelan también que en Nalanda se transmitía un amplio abanico de conocimientos. La filosofía y la vida monacal formaban parte del programa docente, al igual que, por ejemplo, los escritos brahmánicos, la lingüística, la lógica y la medicina. En el siglo VII, el monasterio constituía un centro del idealismo budista, según el cual todo lo que percibimos son creaciones del espíritu. Muchos renombrados eruditos enseñaron en Nalanda; entre ellos, el lógico indio Dignaga (ca. 480-540) y Shantideva, hijo de un rey del sur de la India, que, según la tradición, se hizo monje en el siglo VIII.

Los historiadores del arte han estudiado estatuas de Buda, de *bodhisattvas* (en sánscrito, «seres destinados a alcanzar la iluminación») y de divinidades protectoras budistas, así como otras figuras de piedra y de bronce, también de las zonas cercanas. Gracias a ello, han llegado a la conclusión de que, como mucho a partir de la época de Yi Ching, el monasterio tuvo que ser un centro del budismo tántrico. Junto a la meditación clásica, esta escuela esotérica enseña rituales complejos para alcanzar la iluminación, integrando en ellos todo un panteón de budas, *bodhisattvas* y otros seres sobrenaturales.

Incluso mucho más tarde, el historiador tibetano Butön Rinchen Drub (1290-1364) otorga a Nalanda una importancia suprarregional en su *Historia del dharma*. Tanto esa influencia secular como los ambiciosos estudios que allí se cursaban, los cuales iban más allá de las enseñanzas budistas, justifican el calificativo de universidad en el mismo sentido en el que este se ha aplicado a las madrasas islámicas o las instituciones medievales europeas. Solo que Nalanda fue la institución educativa de este tipo más antigua: Al-Zaytuna, en Túnez, fue fundada en 737, y la universidad de Bolonia, en 1088.

La gestión y el mantenimiento del yacimiento se hallan a cargo del Servicio Arqueológico de la India, y sus edificios y estupas, reconstruidos o conservados, evocan aún hoy el esplendor del pasado. Estatuas de piedra y bronce, monedas, sellos de terracota e inscripciones que se conservan en diferentes museos ilustran la riqueza y complejidad de la vida religiosa del monasterio, así como su estrecha vinculación con el entorno político y social.

Cuando, entre los siglos XI y XIII, el budismo desapareció del norte de la India, Nalanda no pudo escapar a su destino. Según las fuentes, el conquistador musulmán Bajtiiar Jalyi destruyó la ciudad en 1193. En los estratos arqueológicos correspondientes a aquella época, situados en la parte sur del monasterio, se aprecian, de hecho, huellas de un incendio. No obstante, el estado de conservación relativamente bueno de las demás ruinas parece apuntar más bien a un deterioro paulatino.

Fuera de la India, Nalanda siguió siendo una referencia para el mundo budista, como demuestran diversas fuentes. Con el descubrimiento de sus impresionantes ruinas en el siglo XIX, el sitio adquirió fama internacional, cargándose de nuevo de simbolismo. Incluso en la moderna India laica, donde las religiones más extendidas son el hinduismo y el islam, en 1951 se construyó en las inmediaciones del yacimiento el Nava Nalanda Mahavihara («Nuevo monasterio de Nalanda»), un centro de estudio y formación para monjes budistas. A esta institución le siguió en 2010 la Universidad de Nalanda en Rajgir. El concepto arquitectónico del lugar, que cabe calificar de monumental (con edificios de ladrillo, líneas rectas, formas que recuerdan a las estupas y estanques artificiales) está inspirado claramente en su predecesor histórico. En 2016, el sitio arqueológico fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Es de esperar que semejante distinción contribuya a preservar en la memoria la primera universidad de la humanidad.



**PARA SABER MÁS**

**Nalanda (3 volúmenes).** Bhaskar Nath Misra. B. R. Publishing Corporation, 1998.

**Nalanda: Situating the great monastery.** Frederick M. Asher. The Marg Foundation, 2015.

**Nalanda mahāvihāra: A critical analysis of the Archaeology of an Indian buddhist site.** Mary L. Stewart. Manohar, 2017.

CONSERVACIÓN

# ¿SALVARÁ LA INGENIERÍA GENÉTICA A LAS GALÁPAGOS?

En el célebre archipiélago, las especies invasoras están abocando a la extinción a la fauna autóctona. Algunos conservacionistas se preguntan si la manipulación genética podría evitarlo

*Stephen S. Hall*





LAS IGUANAS MARINAS DE LAS GALÁPAGOS son vulnerables a los gatos silvestres y a otros depredadores invasores.



**Stephen S. Hall** es un laureado escritor y periodista científico. Colabora con numerosos medios y es profesor de periodismo en la Universidad de Nueva York.



l 25 de septiembre de 1835, en el curso de la escala del *HMS Beagle* en las Galápagos, Charles Darwin puso pie por primera vez en la entonces llamada isla Charles. Halló en ella una colonia de 200 o 300 almas, casi todos exiliados políticos de la República del Ecuador, deportados tras un golpe de Estado frustrado. Las tierras bajas no le causaron una honda impresión, con su «matorral sin hojas», pero tras caminar seis kilómetros tierra adentro y ascender hasta un mísero poblado situado en las alturas, halló «un frondoso verdor» donde se cultivaban la batata y el banano, además de un grupo de colonos que, «pese a lamentar su pobreza, obtenían sin gran esfuerzo los medios de subsistencia». Eso era así gracias, sobre todo, a las tortugas gigantes que vagaban por las tierras altas de esa y otras islas, cuya abundancia se contaba por decenas de miles. Darwin apuntó, casi como una ocurrencia tardía que «en los bosques hay muchas cabras y cerdos asilvestrados».

En la mañana del 25 de agosto de 2017, Karl Campbell bajó de un bote bimotor que momentos antes había amarrado en el muelle de la humilde isla. Rebautizada como Floreana, hoy habitan en ella 144 personas, la mitad que en la época de Darwin; da la impresión de que nuestro protagonista las conoce a todas. Vestido con una camiseta donde se lee «Island Conservation», saluda primero a Claudio Cruz, al volante del autobús local, con quien intercambia comentarios jocosos. A continuación, agita el brazo a Joselita y Joselito, responsables del punto de control de bioseguridad instalado por el Gobierno ecuatoriano en el muelle. Su trayecto por la única carretera pavimentada de Floreana sigue salpicado de saludos, chanzas y besos en la mejilla.

Extrovertido y sociable, a este australiano de 42 años, que vive en las Galápagos desde hace veinte, le gusta entablar conversación. Pero su trato afable y campechano forma parte de la delicada labor social que ejerce. Campbell es doctor por la Universidad de Queensland con una tesis versada en el control de plagas causadas por vertebrados, y desde 2006 trabaja como especialista en erradicación para Island Conservation. Esta entidad, con sede en Santa Cruz, California, se dedica a la conservación de la biodiversidad y a evitar las extinciones causadas por especies invasoras en islas de todo el planeta. Ese año, la organización se embarcó en la eliminación de las cabras y los burros cimarrones de Floreana. Una década después, Campbell ostenta el cargo de director de proyectos, el más ambicioso de los cuales vuelve a centrarse en esta isla, ya que se propone exterminar hasta la última rata y el último ratón de su superficie.

La Tierra alberga cientos de miles de islas. «Es imposible actuar en todas», lamenta Campbell. En su opinión, las organizaciones conservacionistas tienen la capacidad para desratizar una decena o, a lo sumo, una veintena cada año. Así que, ¿cuáles precisaban esa intervención con más urgencia? «Ante esta tesitura, elaboramos una lista de lugares donde habría que actuar con premura para evitar la desaparición de especies.» Floreana figuraba en cabeza.

«La isla presenta uno de los mayores índices de endemismos de las Galápagos, la tasa más alta de extinciones causadas por especies invasoras y, con mucho, la mayor cantidad de especies en peligro crítico, lo que le otorga la máxima prioridad, no solo en las Galápagos, sino en el mundo entero», explica como parte de un discurso cuyo tono y apremio deja traslucir incontables charlas ante patrocinadores y donantes, periodistas y, probablemente, ante todos y cada uno de los habitantes de Floreana.

El proyecto raya el límite de la viabilidad con las técnicas de erradicación actuales. La isla es extensa (17.253 hectáreas) y está habitada, lo que complica enormemente la tarea, pues exige explicar a los residentes la logística y las consecuencias del proyecto, de las cuales no es menor el plan de esparcir 400 toneladas de raticida por toda su superficie. Por eso, desde 2012, Campbell y sus colaboradores, como Carolina Torres y Gloria Salvador, han acudido a Floreana casi una vez al mes para reunirse con los isleños, describir el proyecto y planificar el operativo necesario para proteger de los efectos del veneno a sus habitantes, adultos y niños, además del ganado, el agua y las especies amenazadas.

EN SÍNTESIS

**Las especies invasoras** han causado problemas en las Galápagos desde que los primeros marinos pusieran su pie en ellas siglos atrás. Cientos de plantas, insectos, aves y mamíferos introducidos habitan hoy en el archipiélago, donde desplazan a las especies autóctonas.

**La erradicación de los intrusos** representa una tarea a menudo cruenta. En la isla de Floreana, un plan contempla esparcir 400 toneladas de raticida para acabar con los roedores invasores. Ello exigirá realojar durante semanas a los animales de compañía y de granja, y tal vez a los niños.

**La manipulación genética,** mediante la alteración de la herencia sexual de los roedores para que engendren solo machos y sus poblaciones desaparezcan con el tiempo, es tema de debate como alternativa segura al veneno y a las armas de caza. Pero ¿qué riesgos entraña? ¿Será realmente eficaz?

PÁGINAS ANTERIORES: TUI DE ROY




LA RATA COMÚN O PARDA (*1*) es el objetivo principal de una campaña de erradicación de especies invasoras planeada en la isla de Floreana, donde los burros (*2*), el ganado (*3*) y otras muchas especies alóctonas han sido introducidas a lo largo de los siglos. En la vecina isla de Isabela, las cabras naturalizadas están despojando el paisaje del último reducto de la tortuga gigante de las Galápagos (*4*).

KRYSTYNA SZULECKA, ALAMY (1 Y 3); WOLFGANG KAEHLER, GETTY IMAGES (2); TUI DE ROY (4)

Las campañas de semejante alcance exigen una precisión y una logística de escala casi militar, motivo por el que Campbell ha estado buscando desesperadamente una alternativa a las contundentes técnicas actuales. En su opinión, una de las más interesantes es una nueva modalidad controvertida de ingeniería genética denominada impulso génico (*gene drive*). A la vista de las frustraciones organizativas que debe soportar a diario con el proyecto de Floreana, a Campbell le cautiva esta técnica.

La estrategia básica del impulso génico consiste en alterar el ADN de los ratones, sea mediante la nueva herramienta de edición genética CRISPR u otras técnicas de ingeniería genética, con el fin de favorecer la herencia de uno de los dos sexos. Si, pongamos por caso, se engendrasen solo machos, la población intrusa de ratones acabaría careciendo de hembras y quedaría abocada a un callejón sin salida reproductivo. En la actualidad, el impulso génico dista de ser una estrategia factible, pero Island Conservation ha estado colaborando con biólogos moleculares de EE.UU. y Australia para crear esos ratones genéticamente modificados, una posibilidad por la que Campbell no ha ocultado su entusiasmo.

Por su parte, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU., en un análisis publicado en 2016 acerca de los riesgos y las ventajas del impulso génico, incorporaron el ejemplo de la población desfeminizada de ratones como parte de una serie de situaciones hipotéticas en que dicha técnica podría aplicarse. Tal y como destaca el informe: «Las perspectivas depositadas en los ecosistemas por la humanidad y la relación de esta con la naturaleza, así como su impacto sobre los ecosistemas y la manipulación que de ellos hace, ocupan un lugar destacado en el incipiente debate surgido en torno al impulso génico». En cierto sentido, ese debate ya ha dado comienzo en Floreana, donde sus residentes llevan sopesando las ventajas y los riesgos de la drástica intervención (por bien que no genética) de su valioso entorno durante el último lustro.

Campbell es el primero en reconocer que las Galápagos no serían el primer ni el mejor lugar en el que someter a prueba el impulso génico. Pero sí podría ser el más adecuado para reflexionar sobre sus repercusiones, buenas y malas, en el contexto de la conservación de las especies. Si, como comunidad global, valoramos la protección y la conservación de la biodiversidad de las Galápagos (valor ratificado al ser declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO), también tendremos que lidiar con las complejidades y las paradojas que entraña la eliminación de las especies invasoras, que básicamente legitima el exterminio a escala local de ciertos animales en beneficio de otras especies, incluidos los humanos. Porque, como Campbell suele recalcar: «Nadie visita las Galápagos para ver ratas, cabras o gatos».

### «CRUEL Y DESPIADADA»

En el imaginario público, el célebre archipiélago se ha convertido en sinónimo de armonía ecológica y naturaleza virgen. Sin embargo, la realidad es bien distinta. Nadie duda de que las tortugas gigantes son magníficas, pero de las miles que antaño vagaban por las colinas de Floreana, hoy apenas sobreviven un par de docenas, todas traídas de otras islas porque las autóctonas se extinguieron. Cierto que los atrevidos pinzones son encan-

tadores y preciosos, pero el sinsonte de Floreana desapareció hacia 1880 y constituye una de las 13 especies extintas en la isla. Y, en efecto, las tortugas marinas que nadan con parsimonia en la playa de La Lobería son fabulosas, pero sus puestas son saqueadas por depredadores indiferentes. Toda esa fauna emblemática corre grave peligro a causa de las especies invasoras.

El paraíso de las Galápagos muestra un lado sombrío desde hace mucho tiempo, quizá desde que Tomás de Berlanga, obispo de Panamá, perdiera el rumbo y las descubriera en 1535. Tal vez la primera especie invasora genuina que puso pie en ellas fueran los filibusteros que las frecuentaron en el siglo XVII, secundados por las tripulaciones de los balleneros un siglo más tarde. Aquellos hombres de mar trajeron consigo un arca maligna de mamíferos deplorables que desembarcaron en un territorio prácticamente inalterado durante millones de años. Al lector prolijo le gustará saber que el primer espécimen invasor que residió en Floreana del que existe constancia documental se llamaba Patrick Watkins: era un marino irlandés que fue abandonado en sus orillas en torno a 1805. Cultivaba verduras, que trocaba por ron con los navíos que recalaban allí. Su historia sirvió de inspiración a Herman Melville para el relato de Las Encantadas.

Tres años antes de la visita de Darwin, en Floreana ya prosperaba un auténtico zoológico de especies invasoras. No es casualidad que, en la bibliografía científica, la primera fecha en que aparece registrada una de ellas sea 1832. Ese año, el general José de Villamil, primer gobernador de las Galápagos, arribó a la isla para organizar la colonia penal. Así lo apunta Claudio Cruz, agricultor, historiador aficionado, conductor de autobús y el mayor terrateniente de Floreana: «Trajo de todo: cabras, burros, vacas, mulas, caballos, perros, cerdos, ratas». Similares desembarcos se sucedieron en otras islas del archipiélago a lo largo del siglo XIX, con consecuencias trágicas para la flora y la fauna autóctonas. Villamil ordenó traer las mulas y los burros para acarrear las tortugas desde las tierras altas. En el momento de su visita, Darwin narró que años antes una fragata había embarcado 200 tortugas en una sola jornada (según él, otros buques subieron a bordo hasta 700).

Los mamíferos recién llegados causaron estragos en el ecosistema, de modo directo e indirecto. Los burros rompían los huevos de las tortugas cuando se revolcaban en el suelo. Los gatos asilvestrados devoraban los pollos de las aves marinas y las crías de las lagartijas de la lava (*Microlophus* sp.), al igual que los ratones. Las cabras sueltas devoraron la vegetación como auténticas segadoras vivientes, arrebatando el sustento secular de las tortugas y desbrozando el terreno para las plantas invasoras como el guayabo (*Psidium guajava*), que se ha extendido a lo largo y ancho de las tierras altas. La culebra de las Galápagos (*Pseudalsophis biserialis*), en el pasado un ofidio tal vez abundante, se halla hoy extinta. Más de 750 plantas exóticas y casi 500 insectos llegados de ultramar han colonizado este grupo de islas.

La misma historia se ha repetido en todo el archipiélago, si bien con algunos capítulos sumamente extraños. En un compendio de 2012 sobre vertebrados foráneos de las Galápagos, R. Brand Phillips, David A. Wiedenfeld y Howard L. Snell, todos entonces miembros de la Estación de Investigación Charles Darwin de Puerto Ayora, en Santa Cruz, clasificaron un total de 44 especies exóticas, casi la mitad de ellas con poblaciones naturalizadas. El registro contenía desde los intrusos obvios (cabras, cerdos, vacas o ratas negras) hasta una galería poco grata de animales foráneos. La tilapia del Nilo, un pez de agua dulce, apareció en la isla de San Cristóbal en 2006; en dos islas se han visto ranas arborícolas (Hylidae). Con los años, la lista de colonizadores ha aumentado, con la incorporación del geco enlutado (*Lepidodactylus lugubris*), patos domésticos, garcillas bueyeras, periquitos, pavos reales y estorninos. Tres monos de una especie indeterminada habitaron en Floreana durante la década de 1930, y en 1937 un empresario del lugar intentó crear una colonia de ocelotes en la isla de Santiago. ¡Ocelotes!

Los humanos forman también parte de esas oleadas de invasión y su impacto no cesa de crecer. En 1984, la población ascendía a 6000 habitantes, asentados en cinco de las 129 islas e islotes; hoy ya superan los 30.000. ¿Y los turistas? Hace tres décadas las visitaban 20.000 al año; en 2016 fueron 218.000. En paralelo con la creciente afluencia de viajeros que desean admirar su biodiversidad, esta se ve cada vez más amenazada por las especies invasoras.

El Parque Nacional de las Galápagos, que controla el 97 por ciento de la superficie del archipiélago, intentó exterminar por primera vez las cabras en la isla Pinta en 1971, una campaña infradotada de medios que demostró la máxima de que, por lo que respecta a la erradicación, conseguir un éxito del 99 por ciento significa un fracaso rotundo. Victor Carrión, antiguo funcionario del servicio del parque que participó en numerosas batidas, recuerda que cuando el programa concluyó solo quedaron en la isla diez cabras. Una década después volvían a ser 2000.

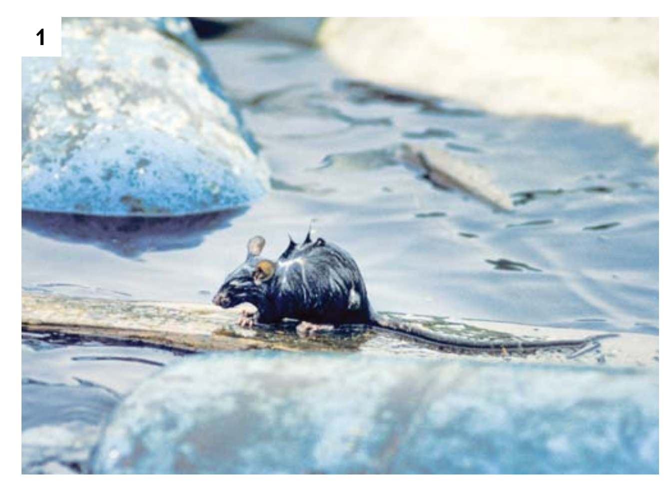
CONSERVACIÓN

## Lugar de intervención

**Island Conservation,** entidad con sede en California, colabora con las autoridades ecuatorianas en la planificación del exterminio total de las ratas y ratones de Floreana, una isla relativamente extensa y habitada del archipiélago de las Galápagos.




MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)





LA RATA NEGRA (*1*), llegada a las Galápagos en navíos a inicios del siglo XVII, devora los huevos de los reptiles y las aves autóctonas. Para luchar contra ella, los biólogos han decidido esparcir cebo envenenado por las zonas de nidificación del paíño de las Galápagos (*2*) y de otras especies.

TUI DE ROY (1); PETE OXFORD, GETTY IMAGES (2)

El servicio del parque comenzó a diseñar mejores planes de exterminio a finales de los noventa. Por entonces, Campbell, con 22 años, llegaba al archipiélago mientras pensaba en qué dedicarse en la vida. No sentía ninguna predilección por el lugar, salvo quizá por el hecho de que, en su adolescencia en Brisbane, había criado cientos de pájaros en aviarios construidos por él mismo. En agosto de 1997 trabajó como voluntario en un proyecto de eliminación de cabras en la isla de Isabela. Una década más tarde dirigiría algunos de los proyectos de erradicación insular más ambiciosos —y polémicos— del mundo.

### EL MAL QUE CONOCEMOS

La erradicación es un asunto desagradable y eufemístico. En 2004, el Servicio del Parque Nacional y la Fundación Charles Darwin emprendieron una campaña para acabar con las cabras de la parte deshabitada de Isabela, en el norte de la isla, la mayor del archipiélago. Dos helicópteros dieron caza a los rumiantes desde el aire con dos o tres tiradores a bordo, armados con escopetas y rifles semiautomáticos. Después de esa primera batida aérea, cazadores a pie con perros adiestrados se adentraron en las zonas con vegetación densa para acabar con las sobrevivientes. En la última fase, a inicios de marzo de 2005, el equipo de liquidación desplegó cerca de 700 cabras «Mata Hari» y «Judas».

La tesis doctoral de Campbell había abordado el desarrollo de la cabra Mata Hari, una variante de la Judas, creada en los años ochenta. Estas últimas van provistas de collares radiotelemétricos. La cabra es un herbívoro muy gregario, por lo que los cazadores siguen a los ejemplares equipados con radiotransmisores para dar con sus congéneres. Las cabras Mata Hari van un paso más allá; son hembras provistas de implantes hormonales que estimulan un celo permanente, por lo que buscan y atraen a los machos. Campbell instruyó a los cazadores de las islas para que pudieran someterlas a una operación quirúrgica de campaña, consistente en ligar las trompas de Falopio para esterilizarlas, insertar los implantes hormonales que estimulan el celo permanente y, por último, colocarles un collar con un transmisor de radiotelemetría para seguir su rastro. Una vez en libertad, las cabras Judas y Mata Hari delataron los últimos reductos de sobrevivientes. Cuando todo acabó, el proyecto de Isabela había exterminado 62.818 cabras, con un coste cercano a 4,1 millones de dólares. En palabras de Carrión, la principal queja de los lugareños fue que no recibieron ni un pedazo de carne. «Nos dijeron: "¡Pasamos hambre y necesitamos esa comida!"», recuerda. Ni siquiera bastó esa vez el éxito rotundo conseguido, del cien por cien; por lo menos en nueve ocasiones, según su testimonio, residentes contrariados volvieron a introducir deliberadamente especies que habían sido eliminadas, en parte como protesta contra las normativas locales de pesca.

La magnitud de las campañas de erradicación en las Galápagos causa estupor: 79.579 cabras eliminadas en Santiago, 41.683 en Pinta, 7726 en San Cristóbal; en total, 201.285 en 13 islas —el hecho de que se usen eufemismos como «eliminar», en lugar de «matar», ya da una pista de lo cruento que es todo este asunto—. Es una jugada bastante buena que la multitud de visitantes que acude para nadar con las tortugas marinas y contemplar el vuelo grácil de sus históricas aves ignore que las islas se han convertido durante las dos últimas décadas en un verdadero matadero, todo en aras de la conservación de su célebre biodiversidad.

Hasta una pequeña campaña de desratización ilustra cuán arduos pueden llegar a ser los métodos tradicionales. En 2012, el servicio del parque y sus colaboradores comenzaron a diseminar brodifacoum en la pequeña isla deshabitada de Pinzón para acabar con las ratas, que desde hacía decenios rapiñaban las puestas y las crías recién nacidas de las tortugas gigantes. La erradicación culminó con éxito y por primera vez en un siglo



LA TORTUGA GIGANTE DE FLOREANA se daba por extinta, pero recientes estudios genéticos han descubierto una especie afín en la cercana Isabela. Los biólogos están criando ejemplares en cautividad con el propósito de repoblar Floreana.

TUI DE ROY

se registró un notable censo de crías de tortuga en la isla. Pero el veneno llegó de algún modo hasta las lagartijas de la lava, que son presas del amenazado gavilán de las Galápagos (*Buteo galapagoensis*), lo que provocó al menos 22 muertes por envenenamiento de esta rapaz (a pesar de que muchos ejemplares habían permanecido a salvo confinados durante dos semanas). En una ocasión se hallaron concentraciones sumamente altas de raticida en el cadáver de una lechuza más de dos años después de la diseminación del cebo.

Y eso nos devuelve a la erradicación más ambiciosa planeada en las Galápagos y quizás en el mundo entero, empresa a la que todos en Floreana llaman simplemente «el Proyecto».

### EL MAL RESIDE EN LOS DETALLES

Floreana cuenta con una tienda y una sola carretera. Como en cualquier otro lugar de las Galápagos, las viviendas son sencillas construcciones de ladrillos de ceniza con tejado de chapa corrugada. Si uno desea acudir a uno de los contados restaurantes de su única población, es mejor que avise con antelación; de lo contrario, tal vez no puedan servirle comida suficiente. Los isleños son personas de hablar pausado, generosos, con un buen humor sutil y profundos principios. Hace unos años, un empresario venido de otra isla cicateó la paga a los lugareños que habían trabajado para él. Desde entonces, nadie quiso servirle comida, nadie le alquiló una habitación para dormir y todos dejaron de dirigirle la palabra. Su proyecto fracasó estrepitosamente. La peculiar diplomacia que impera en la isla y la firme independencia de sus habitantes convierten esta empresa en un desafío desde el punto de vista social. Como Campbell afirma: «Las cosas se pueden torcer con suma rapidez».

Una consigna recurrente en el reciente informe de las Academias Nacionales de EE.UU. sobre el impulso génico —y, a la sazón, en casi cualquier documento oficial sobre ingeniería genética que haya visto la luz en los últimos cuarenta años— es la necesidad de contar con el respaldo de la ciudadanía [*véase* «Ciencia abierta a la ciudadanía», por Brooke Borel; Investigación y Ciencia, diciembre de 2017]. Pero esa frase incruenta no refleja la tensión y la complejidad de los proyectos en su día a día. Si la erradicación suele ser una labor ingrata, en las islas habitadas lo es aún más. Eso le quedó claro a Campbell hace unos años, en el curso de una pequeña reunión con los habitantes de Floreana con motivo del Proyecto. Uno de ellos, rotundamente opuesto a la propuesta de sacar el ganado de la isla, le miró fijamente a los ojos y le espetó: «Si haces eso, te mato». Campbell no ha olvidado aquel momento tan difícil.

La intensidad de las emociones desatadas no sorprende del todo, dada la magnitud del proyecto. Desde 2012, las autoridades de las Galápagos, junto con Island Conservation, han estado elaborando lo que consideran el plan de erradicación más complejo llevado a la práctica en una isla poblada hasta la fecha. No solo son los adultos beligerantes de Floreana los que complican las cosas. También están los niños, los animales de granja y los de compañía, por no mencionar las aves amenazadas y las lagartijas de la lava.

Piénsese en los alarmantes riesgos ambientales que entraña una erradicación tradicional, sin técnicas genéticas de por medio. Para acabar hasta con la última rata y el último ratón de Floreana, el plan desplegará helicópteros que lanzarán unos 360 millones de gránulos de 1 gramo de brodifacoum, no una, sino dos veces, en las tierras bajas costeras, y otras tres veces en las altas; todo ello a lo largo de dos meses. A fin de minimizar los riesgos para la salud y el ambiente, se adoptarán medidas de precaución extraordinarias. Se protegerán los recursos hídricos. Los niños habrán de abandonar la isla durante seis semanas. Los animales de compañía tendrán que ser igualmente evacuados o confinados en los hogares o en jaulas. El ganado mayor, como el vacuno, el equino o el porcino, permanecerá estabulado en sus corrales, pues los granjeros no aceptaron de ningún modo su traslado fuera de la isla durante medio año. Pollos y gallinas tendrán que permanecer alojados en nuevos gallineros cubiertos, construidos ex profeso para la actuación. Las tortugas gigantes del refugio de Asilo de la Paz también quedarán confinadas un tiempo. Habrá que capturar a las aves amenazadas y recluirlas en aviarios al efecto mientras dure la dispersión del veneno. En aquellos lugares donde el cebo lanzado no pueda llegar, como los edificios, las casas y demás construcciones, el equipo de desratización colocará trampas. Habrá que concretar la ubicación de cada caja con cebo en cada hogar, y Carolina Torres, abogada de Island Conservation, tendrá que redactar un consentimiento escrito para cada domicilio. «Una sola hembra preñada o un solo rincón sin tratar, y todo se irá al garete», advierte Campbell.

El personal de Island Conservation ha elevado la idea de ganarse el apoyo de la ciudadanía hasta cotas inauditas. En una de sus últimas visitas, Torres trajo chocolatinas para Ericka Wittmer, matriarca de una de las familias más antiguas de la isla, y ofreció asesoramiento a varios agricultores sobre una cuestión legal referente a contratos de arrendamieno de parcelas de su propiedad. Hace poco, la entidad ha facilitado pintura a

los propietarios de las viviendas para que enluzcan sus paredes de ladrillos de ceniza. Cuando uno de los residentes expresó su interés por abrir un restaurante, Campbell y Torres le animaron y se comprometieron a ser clientes suyos. La entidad ha contratado arquitectos para que diseñen nuevos gallineros para los granjeros, que costarán 22.000 dólares cada uno. Campbell ha aprendido a la fuerza que entablar una relación personal con cada uno de los floreanos es el mejor modo de implicarles en la toma de decisiones de un proyecto tan delicado. «Si montas una asamblea al estilo de un ayuntamiento, te destrozan sin piedad», explica. «Dos o tres acaparan la conversación, ya no sabes lo que piensan los demás y, al final, has de dedicar muchas horas a aclarar los malentendidos.»

Pese a las reticencias iniciales, Campbell afirma que la mayoría está de acuerdo con el plan de erradicación. En las tierras altas, el agricultor Holger Vera maldice la voracidad de los roedores mientras permanece en pie en un huerto de naranjos, ananás y otros cultivos. Devoran las plantas jóvenes de maíz, mordisquean las piñas, escarban y roen los tubérculos de la yuca, se lamenta. «Hasta la han tomado con la caña de azúcar. Se lo están comiendo todo. Pero si conseguimos librarnos de ellos, podremos plantar de todo.» Al principio Vera se mostraba escéptico, asegura Torres, pero ahora se halla entusiasmado con el Proyecto. ¿Aunque tenga que despachar en barco a sus siete perros por un tiempo? «Sí, sí», contesta. De forma similar, Cruz, propietario de 80 vacas, 130 cerdos, más de 200 pollos y gallinas, 10 caballos y dos perros, está de acuerdo con el plan y el modo en que ha sido debatido con los vecinos de Floreana. «Nos sentimos parte del proceso de decisión», afirma.

Básicamente, contamos con el beneplácito verbal de casi todos los residentes, asegura Campbell. El plan aguarda el visto bueno definitivo de las autoridades de las Galápagos. Cree que podría dar comienzo este año si los fondos estuvieran garantizados a su debido tiempo. (El coste total se cifra en 20 millones de dólares, pero los contratiempos en la obtención de los fondos ya lo han retrasado hasta por lo menos 2020; Campbell calcula que cada año de demora supone otro millón más.) A pesar de la incertidumbre económica, la realidad del Proyecto se ha hecho tangible con la llegada a Floreana, a mediados de julio del año pasado, de siete contenedores marítimos de seis metros. Están destinados a guardar el pienso y el forraje sin contaminar con los que se alimentará al ganado durante la desratización; algunos granjeros ya han comenzado a usarlos.

Llevar a buen término un proyecto tan complicado es como gestionar un ecosistema burocrático: hacer encajar la parte legal, la parte de la participación ciudadana, la logística, la financiación, la mitigación del efecto del raticida, etcétera. Por eso Campbell opina que el proyecto de Floreana tensa hasta el límite la capacidad de los medios de erradicación tradicionales. Y es por esa razón por la que con relativa frecuencia afirma: «Si dispusiéramos de las técnicas de impulso génico, las conversaciones serían más sencillas y las respuestas mucho más pragmáticas».

### EL MAL QUE NO CONOCEMOS

Campbell se interesó por primera vez por las posibilidades del impulso génico en 2011, cuando asistió como oyente a una teleconferencia entre biólogos de la Universidad de Carolina del Norte y funcionarios del Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. en la que se debatía una posible estrategia genética para controlar una plaga de ratones que afectaba a la isla Farallón Sureste, unas 20 millas al oeste de la costa de California, cerca de San Francisco. John Godwin, neurobiólogo de la citada universidad que estudia el comportamiento animal, supo del problema de esa isla curioseando en Internet aquel mismo año. Casualmente su universidad contaba con instalaciones para experimentos de manipulación genética en los que se contemplaban las consecuencias éticas de la intervención. Dos de sus colaboradores, Fred Gould y David Threadgill, ya habían debatido la posibilidad de alterar el genoma del ratón para crear roedores incapaces de engendrar hembras. Otros dos colaboradores, Jennifer Kuzma y Jason Delborne, se involucraron a fondo para que los amplios sectores interesados (organismos oficiales, responsables de bienestar animal, especialistas en bioética y, por supuesto, el gran público) iniciasen una reflexión acerca de la posibilidad de liberar en la naturaleza animales genéticamente modificados. Kuzma y Gould son codirectores del Centro de Ingeniería Genética y Sociedad de la Universidad de Carolina del Norte.



En resumidas cuentas, en 2016 Island Conservation aunó fuerzas con otros grupos internacionales para lanzar el programa Biocontrol Genético contra Roedores Invasores (GBIRd, por sus siglas en inglés). Los científicos de GBIRd están investigando con prudencia herramientas genéticas con el propósito de conservar los ecosistemas insulares. La aparición de CRISPR supuso una incorporación formidable a la empresa de diseñar una estrategia de erradicación alternativa. Y esa iniciativa ganó empuje el pasado julio, cuando la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa de EE.UU. (DARPA) concedió al grupo 3,2 millones de dólares para el desarrollo del impulso génico para exterminar los ratones de las islas.

El fundamento del impulso génico parece contrario a la lógica para cualquiera que haya rumiado sobre la idea de las plantas de guisantes de Gregor Mendel y la herencia al azar de los genes transmitidos por los progenitores. Normalmente, uno tiene una probabilidad del 50 por ciento de heredar un gen de uno u otro progenitor. En casos excepcionales, empero, ciertos genes se ven favorecidos y son heredados con una frecuencia muy superior a la que resultaría por mero azar, es decir, son «egoístas». Uno de esos genes (en rigor, una región del genoma) radica en el cromosoma 17 del ratón: es el llamado complejo T, que se hereda con una frecuencia del 95 por ciento. En teoría, funcionaría como una suerte de comodín, gracias al cual se podría introducir y difundir con rapidez otro gen en una población.

En el supuesto de la erradicación, cabría la posibilidad de unir un segundo gen al complejo T y favorecer su presencia en la mayoría de la descendencia. Uno de esos genes, *SRY*, determina el sexo masculino en el ratón, por lo que si se fijara a un gen egoísta engendraría un creciente número de machos en cada generación (en detrimento de las hembras), hasta que la población acabara masculinizada por completo. Uno de los





LA LAGARTIJA DE LA LAVA endémica de Floreana es presa fácil para los gatos vagabundos.

TUI DE ROY

requisitos básicos del impulso génico es que el tiempo entre las generaciones sucesivas del animal sea corto; nadie duda de que el ratón encaja perfectamente, pues solo diez semanas separan su nacimiento de la madurez sexual. Si los ratones de laboratorio pudieran ser manipulados para que transmitiesen el gen deseado, como el que engendraría individuos de un mismo sexo, y esos ratones se reprodujeran con éxito en el medio natural, el gen se propagaría con rapidez por la población.

Muchas son las condiciones que deben cumplirse, pero Threadgill, ahora en la Universidad A&M de Texas, ha estudiado la estrategia en los ratones. La nueva raza desfeminizada podría acabar con una población autóctona de ratones sin la necesidad de esparcir veneno por doquier, sin reubicar en otra isla a los demás animales y sin todo el quebradero de cabeza logístico que comporta el proyecto de Floreana. Paul Thomas, biólogo de la Universidad de Adelaida, ha estado valorando las posibilidades de la técnica de edición génica CRISPR como medio para inactivar genes relacionados con la condición de hembra en el ratón, táctica que podría ser adoptada para producir una población con hembras estériles. Y Godwin, el neurobiólogo, está estudiando si los ratones silvestres consentirían el encuentro sexual con el ratón modificado, para lo cual trabaja en este momento con un grupo extraído de Farallón Sureste.

La erradicación de especies no es en absoluto la única aplicación del impulso génico. Target Malaria es una iniciativa que pretende modificar mosquitos para que no puedan transmitir el paludismo; el equipo científico que la dirige, que cuenta con el apoyo económico de la Fundación Bill y Melinda Gates, ya ha puesto en marcha campañas de divulgación en comunidades de África como preparativo para una prueba de campo. Kevin Esvelt, biólogo del Instituto de Tecnología de Massachusetts, anda enfrascado en un proyecto para modificar ratones patiblancos (*Peromyscus leucopus*) en la isla estadounidense de Nantucket con el fin de hacerlos inmunes a la bacteria causante de la enfermedad de Lyme. Por norma general, las islas son el lugar más favorable para realizar una prueba de campo sobre impulso génico: las de menor tamaño son mejores que las extensas, y las deshabitadas, mejor que las pobladas. Campbell presume que el primer ensayo de impulso génico sobre el terreno se realizará con mosquitos, y añade que el escenario más propicio será EE.UU., Australia o Nueva Zelanda, por contar con una legislación lo bastante avanzada como para poder evaluar nuevas y controvertidas técnicas genéticas [*véase* «El gen destructor», por Bijal P. Trivedi; Investigación y Ciencia, enero de 2012].

Si las erradicaciones son polémicas, la modificación genética lo es aún más. «No hay modo seguro de experimentar con esas técnicas en la naturaleza», advierte Dana Perls, veterana activista de la red Amigos de la Tierra. Jane Goodall, Fritjof Capra y otros conservacionistas publicaron una carta abierta el pasado septiembre donde afirmaban que el impulso génico no tiene cabida, «sobre todo en el campo de la conservación». Como un cañonazo de advertencia para Island Conservation, los firmantes declaraban estar «alarmados por el hecho de que algunas entidades conservacionistas hubieran aceptado la financiación y hubieran apostado por el impulso génico, con la liberación de seres vivos modificados en el entorno».

El gran temor son las consecuencias imprevistas, que algo inesperado y grave suceda. No hay duda de que el impulso génico, tal y como las Academias Nacionales de EE.UU. ya han expresado, «podría acarrear efectos perjudiciales para otras especies o ecosistemas», y que eso por sí solo ya justifica suma cautela en su desarrollo. Pero en anteriores debates públicos sobre las técnicas genéticas, como la batalla librada en torno al ADN recombinante en los años setenta, resultó difícil discernir entre las preocupaciones justificadas y los temores infundados.

De vuelta al mundo real, en el curso de una excursión a las tierras altas de Floreana, Campbell y Torres me llevaron a un manantial, no lejos de la cueva donde cuentan que el primer habitante de la isla, el beodo Watkins, durmió sus resacas. Como parte del Proyecto, toda la zona que rodea el manantial, hoy vallada, quedará cubierta por una carpa, y en las tuberías se instalarán filtros especiales para impedir que ni un solo gránulo de raticida penetre en la red, aunque el brodifacoum no es hidrosoluble. Para ganar el apoyo de la opinión pública, afirma Campbell, es preciso abordar tanto los temores justificados como las sensaciones. «Uno debe hacer frente a la percepción que tienen las personas acerca de las sustancias tóxicas. Y esta resulta difícil de cambiar.» Una razón más, prosigue, de que la

estrategia genética genere mayor simpatía. De repente, mientras hablábamos, cambió de tema.

«Ahí lo tenemos», exclamó, señalando hacia un murmullo en la espesura al otro lado de la tela metálica. «¿La ve? ¡Una rata!»

Un par de ojos oscuros y relucientes asomaron brevemente entre las hojas. Campbell la identificó como *Rattus rattus*, la rata negra, devoradora consumada de los huevos y las crías de los paíños de las Galápagos y las tortugas gigantes. Como cualquier otra rata en otro lugar, se esfumó en un abrir y cerrar de ojos. Era la centinela de un grupo sin duda mayor, una amenaza para las que Campbell denomina «especies al límite».

### «LA ASTUCIA O FUERZA DEL INTRUSO»

Cada caminata por las Galápagos se convierte en un paseo naturalista en el que cada ser vivo protagoniza un relato sobre la conservación, algunos con final feliz, otros no. En nuestro último día en Floreana, varios de esos relatos surgieron cuando la mirada aguda de Campbell descubría alguno de los moradores que hacen de este paisaje algo tan querido como amenazado.

Durante el desayuno, un pinzón de Darwin (*Geospiza* sp.) vino a posarse sobre la mesa. Campbell relató que su recio pico negro y amarillo ha adquirido con los siglos la robustez y la fuerza precisas para abrir las semillas singularmente grandes y duras de la variedad de cactus *Opuntia* de Floreana; a su vez, la cactácea no deja de engrosar y endurecer sus simientes para impedir el pillaje, un recordatorio de que la evolución no es un mero concepto de libro de texto, sino un proceso incesante. Momentos después, Campbell divisó un ratón que se ocultó a toda prisa tras una roca de lava. Cuando estábamos acabando el tentempié, otra especie invasora hizo acto de presencia, un garrapatero piquiliso (*Crotophaga ani*), con su plumaje negro y lustroso. Ejemplo de las consecuencias inesperadas de las antiguas prácticas, los agricultores lo introdujeron en las Galápagos en los años sesenta con la esperanza de que acabara con las garrapatas que infestaban sus reses; esperanza vana, puesto que en lugar de cumplir con lo previsto, se limitó a proliferar sin control y acabó convertido en un nuevo intruso.

Poco después, en un paseo por la playa de La Lobería, Campbell señala las huellas recientes dejadas en la arena por gatos vagabundos, que devoran como rosquillas las iguanas jóvenes y las lagartijas de la lava. «Las más pequeñas no tienen ninguna posibilidad de escapar», declara. Cerca de la cabecera de la playa me muestra el pie roído de uno de los cactus arborescentes de *Opuntia*. Mordisqueados por los roedores, dejan de florecer y dar fruto, con lo que privan de un alimento esencial a las tortugas y los sinsontes, sobre todo en la estación seca, además de lugares donde anidar para los pinzones. Ante una pequeña laguna dejada por la bajamar, nos detuvimos para contemplar varias tortugas marinas, magníficas, que habían quedado atrapadas. Sus huevos y crías son otro bocado irresistible para gatos y ratas.

Fue el bulldog de Darwin del siglo XX, Richard Dawkins, quien resucitó la frase del poeta Alfred Tennyson, «La naturaleza es cruel y despiadada», para describir el lado oscuro de la selección natural. No todo es hermoso en la naturaleza, y la idílica ecología de postal que evoca un lugar como las Galápagos esconde a menudo entresijos sombríos y nada románticos entre el depredador y sus presas; una relación cuyo delicado equilibrio ha sido perturbado en reiteradas ocasiones por la acción humana, bien con la introducción de especies invasoras, bien intentando corregir esta con remedios literalmente tóxicos. Y ahora, en un futuro no muy lejano, tal vez tengamos que apostar por técnicas futuristas de modificación genética para restaurar las islas hasta un estado más prístino o primigenio.

Por si sirve de algo, una pequeña encuesta en Floreana reveló que los habitantes no mostraban mucha preocupación por la posible aplicación del impulso génico, aunque no quedó claro si entendieron en qué consistía y sus riesgos. Vera se desentendió de las objeciones y aseguró que no tendría inconveniente en que se aplicara una solución genética contra la plaga de roedores. Ingrid Wittmer, otra descendiente de una de las primeras familias de Floreana, movió la cabeza con gesto de disgusto, pero no por la pregunta, sino preocupada por qué sería de los búhos campestres cuando su principal sustento, los ratones, desaparecieran a consecuencia del Proyecto. Cruz, cuyo padre emigró a la isla en 1939, cuando solo la habitaban 11 personas, ofreció su perspectiva de granjero sobre la idea de los ratones desfeminizados: «Es como la inseminación artificial de las vacas. Si uno quiere hembras, escoge el semen para hembras. Esto es igual».

«A mi modo de ver, hemos creado varios problemas. Y si nos limitamos a sentarnos y permanecer quietos, las consecuencias serán graves», comenta Campbell. «Sabemos qué rumbo ha tomado todo esto. Y realmente no hacer nada es irresponsable, cuando se dispone de una herramienta para solucionarlo.»

Aún no tenemos la herramienta. Pero si la biología molecular sabe aprovechar las facultades del impulso génico y este se destina a controlar las especies invasoras, ya sea en las Galápagos o en cualquier otra isla, valdrá la pena recordar que casi todas las catástrofes ecológicas que ahora contemplamos en el laboratorio viviente de la evolución tienen como responsable a la mano del hombre. Las cabras, los burros, las ratas, los gatos, los cerdos, las mulas, los ratones, y hasta aquellos efímeros ocelotes, llegaron a bordo de embarcaciones, por decisión humana.

En una incisiva observación que resuena casi dos siglos más tarde, Darwin destacó en su diario acerca de su estancia en Floreana que, mientras que las aves de Inglaterra habían adquirido una merecida desconfianza hacia el género humano, las de las Galápagos «no habían aprendido todavía ese temor [tan] saludable». Y pasó a ofrecer las que podrían servir como palabras de advertencia para la ciencia del siglo XXI y, en particular, para el impulso génico. En alusión a la mansedumbre de las aves, escribió: «De estos hechos podemos inferir el enorme trastorno que debe de causar en un país la introducción de un nuevo animal de presa antes de que los instintos de los seres indígenas se adapten a la astucia o fuerza del intruso». IyC


**PARA SABER MÁS**

**Current status of alien vertebrates in the Galápagos islands: Invasion history, distribution, and potential impacts.** R. Brand Phillips et al. en *Biological Invasions*, vol. 14, n.º 2, págs. 461-480, febrero de 2012.

**Regulating gene drives.** Kenneth A. Oye et al. en *Science*, vol. 345, págs. 626-628, 8 de agosto de 2014.

**Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values.** Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU. National Academies Press, 2016. **www.nap.edu/23405**

**EN NUESTRO ARCHIVO**

**Especies invasoras.** Robert Barbault y Anne Teyssèdre en «Conservación de la biodiversidad» colección *Temas* de *IyC* n.º 61, 2010.

**Riesgos de la edición genética.** Jeantine Lunshof en *IyC*, agosto de 2015.

**Presión turística sobre la vida silvestre de las Galápagos.** Paul Tullis en *IyC*, agosto de 2016.

# LAS ESCALAS DEL UNIVERSO

## Un nuevo recorrido por todas las escalas conocidas de la realidad nos lleva hacia las fronteras de la existencia, desde los confines del universo observable hasta el reino subatómico

*Caleb Scharf*

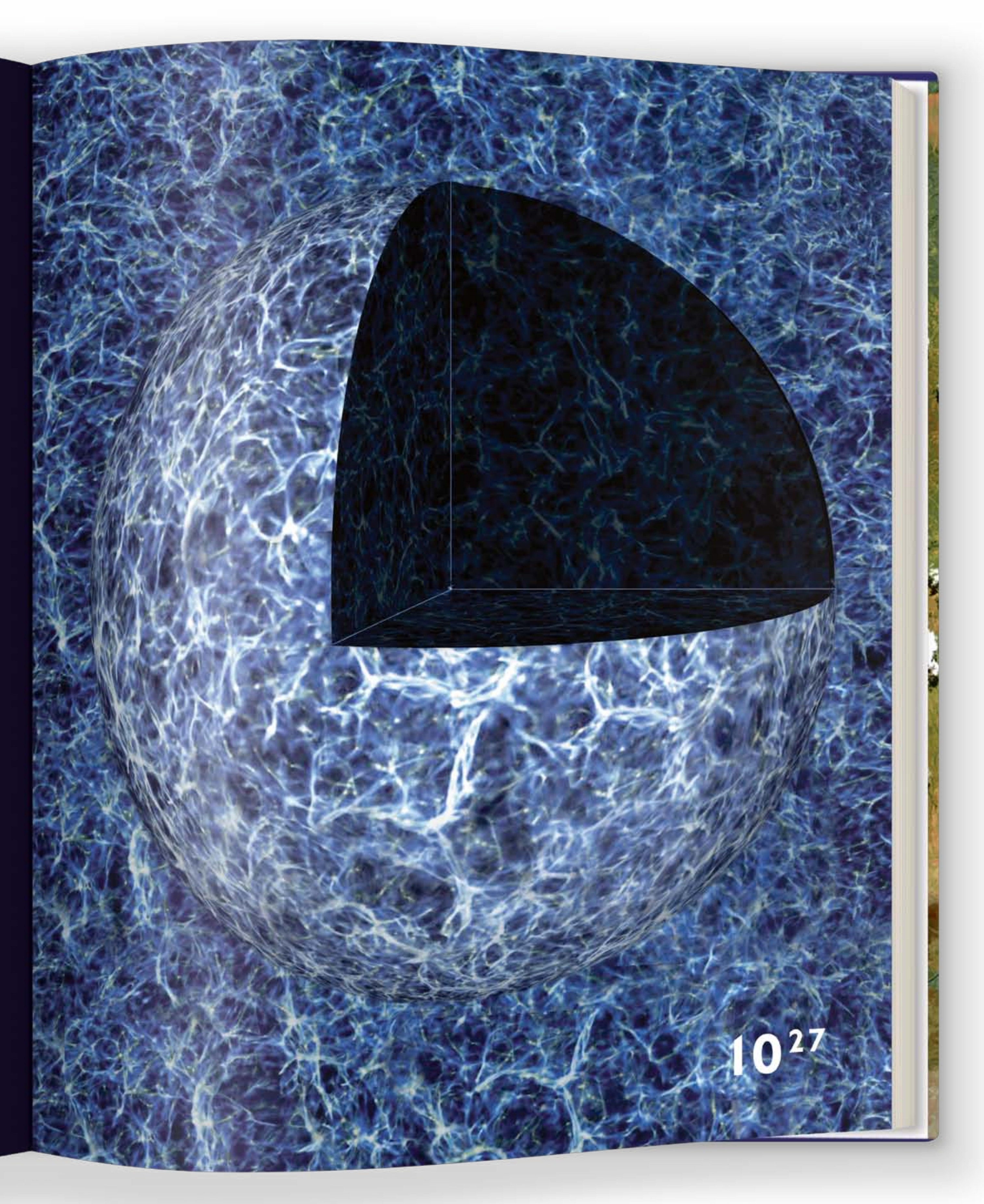
*Ilustraciones de Ron Miller*

¿DESEA ESCUCHAR LA HISTORIA MÁS ÉPICA JAMÁS CONTADA?

Hace mucho tiempo, los átomos que hoy forman su cuerpo se encontraban esparcidos a través de billones de kilómetros de espacio vacío. Miles de millones de años atrás no existía ningún indicio de que esos átomos acabarían llegando a configurar sus ojos, piel, cabello, huesos o los 86.000 millones de neuronas de su cerebro. Buena parte de ellos procedían del interior profundo de una estrella; o tal vez de varias, separadas a su vez por otros muchos billones de kilómetros. Cuando esas estrellas explotaron, arrojaron al exterior parte de su material constituyente, en un torrente de gas abrasador que llenó una pequeña parte de una galaxia: una entre cientos de miles de millones de ellas distribuidas a lo largo de un cuatrillón de kilómetros.

Algunos de esos átomos han estado en el caparazón de un trilobites, o quizá de miles. Desde entonces han formado parte de tentáculos, raíces, pies, alas, sangre y, entre medias, de billones o miles de billones de bacterias. Algunos habrán estado en los ojos de criaturas que contemplaron paisajes de hace cien millones de años; en la yema de huevos de dinosaurio o en el aliento de una criatura jadeante en medio de una glaciación. Para otros, por el contrario, sería la primera vez que se instalaban en un ser vivo, tras haber vagado durante eones por océanos y nubes en forma de gotas de lluvia o copos de nieve. Ahora, en este instante, están todos aquí, dándole forma a usted.

Cada átomo es, a su vez, una estructura con un tamaño del orden de la diezmilmillonésima parte de un metro, lo que lo sitúa en los abruptos límites que separan la realidad que percibimos y el mundo cuántico. Los electrones ocupan difusamente buena parte del espacio por lo demás vacío del átomo. Los protones y los neutrones se agregan en un núcleo 100.000 veces menor que el átomo del que forman parte, y se componen, a su vez, de otras partículas extraordinariamente diminutas: quarks y gluones. En cuanto al electrón, aunque puede que carezca de sentido asignarle un tamaño definido, a efectos prácticos podemos pensar en él como en un objeto diez millones de veces menor que el núcleo.




EL UNIVERSO OBSERVABLE es una esfera con un diámetro de unos 93.000 millones de años luz (unos $10^{27}$ metros) centrada en la Tierra.

Si tenemos en cuenta toda la materia reconocible, en el universo observable podría haber unas $10^{80}$ partículas entre protones, neutrones y electrones. Una cifra tan vasta como insignificante, por cuanto probablemente el número de fotones sea mil millones de veces mayor. Y, a pesar de ello, todo lo anterior no representa más que un 5 por ciento de toda la materia y energía que creemos que hay en el universo. Las observaciones astronómicas indican que existe todo un «reino en la sombra» descrito por partículas subatómicas y fuerzas de la naturaleza hasta hoy desconocidas, las cuales darían cuenta de la mayor parte del cosmos. Un inframundo de materia oscura y energía oscura que domina el universo mientras permanece invisible a nuestros ojos.

Sin embargo, en algún momento hace 13.800 millones de años, todo lo que vemos y lo que no vemos se hallaba comprimido en una porción extraordinariamente diminuta y energética del espaciotiempo en el que aún nos encontramos, junto con cualquier otra cosa que hoy pueda existir a miles de millones de



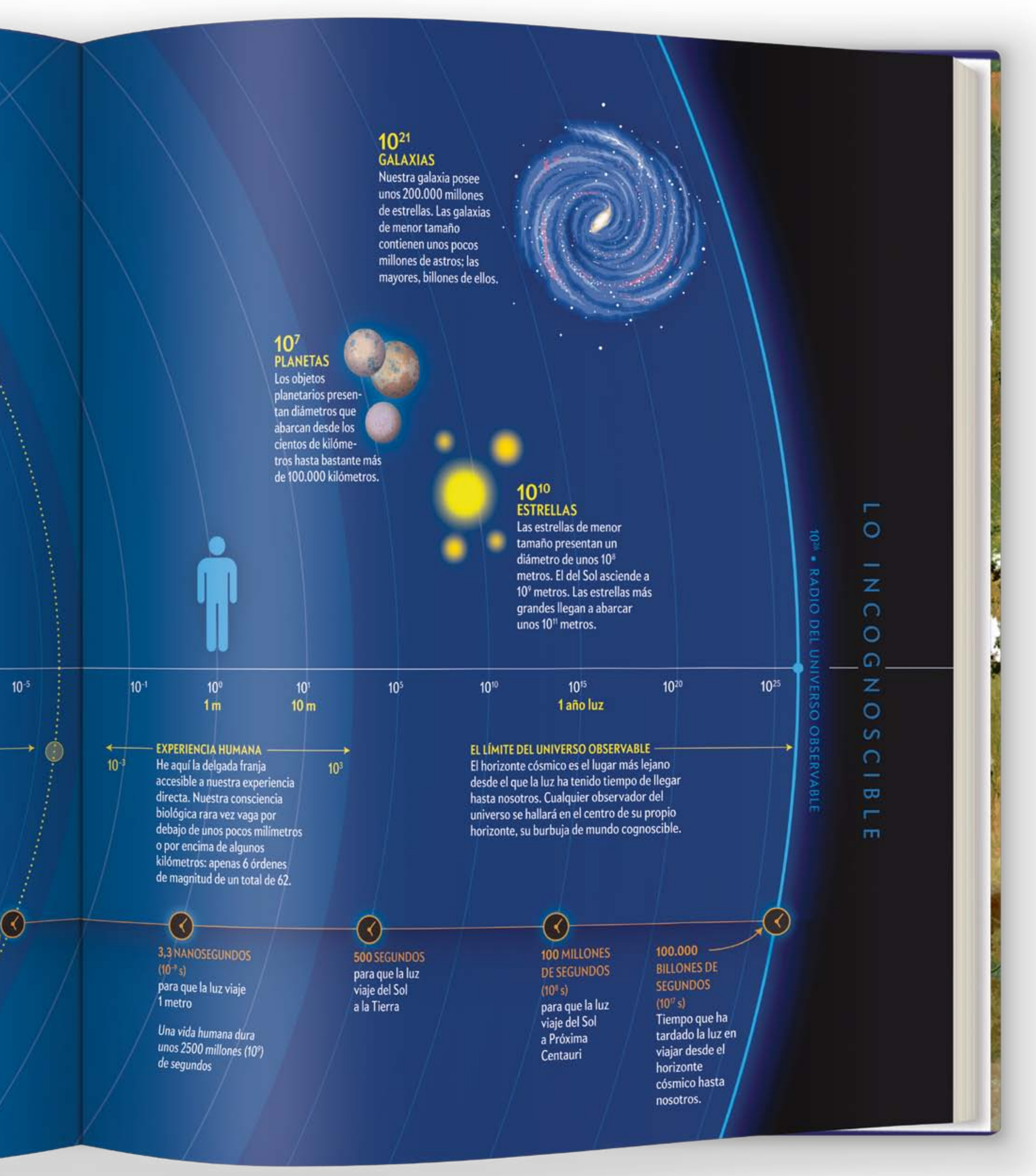

**Caleb Scharf** es director del Centro de Astrobiología de la Universidad de Columbia y autor de *Gravity's engines* (Scientific American/ Farrar, Straus y Giroux, 2012) y *El complejo de Copérnico* (Ediciones de Intervención Cultural, 2016).

**Ron Miller** es autor e ilustrador científico con varios premios en su haber. Su trabajo ha aparecido en *Scientific American*, *National Geographic* y *Smithsonian*, entre otras publicaciones, así como en ediciones contemporáneas de *Veinte mil leguas de viaje submarino* y *Viaje al centro de la Tierra*, de Julio Verne.

años luz de distancia. Incluso hoy, no estamos absolutamente desconectados.

Nuestro relato parece un disparate. Pero no se trata de ninguna ficción, sino de lo que sabemos sobre el universo y su historia.

Para examinar e ilustrar lo que conocemos —y lo que no— sobre la naturaleza en su conjunto, podemos recurrir a un método clásico: ir ampliando o reduciendo en un factor de 10 nuestra escala de análisis, desde los confines del universo observable hasta los entresijos más internos de la realidad. Ya sea por los dedos de nuestras manos y pies o por las matemáticas y mediciones modernas, todos somos capaces de entender la noción de potencias de 10. Si encadenamos esta operación a través de las tres dimensiones del espacio y de esa otra tan escurridiza a la que llamamos tiempo, dispondremos de un lenguaje para expresar las continuidades y las relaciones de la naturaleza mucho más allá de nuestra experiencia cotidiana. Las potencias de 10 nos permiten desplazarnos y observar desde casi todo hasta prácticamente nada.

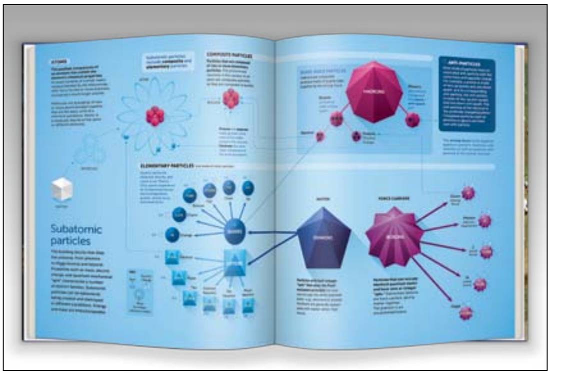


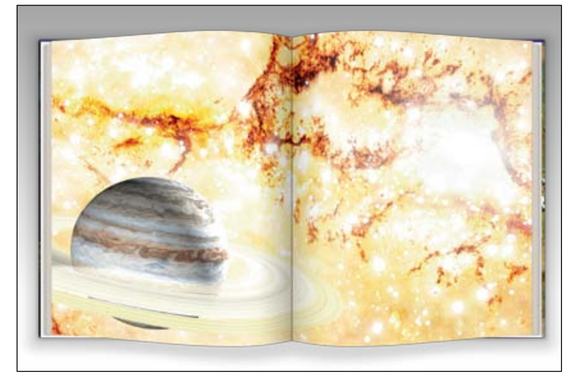

Recreación de una hipotética versión del libro en español




LA MATERIA PRIMA DE LA VIDA: A escalas nanométricas ($10^{-9}$ metros), una molécula de ADN se enrolla en el núcleo de una célula.








Por supuesto, nuestro viaje a través de las escalas no nos permitirá describir con precisión cada detalle del contenido y la historia del universo. Sin embargo, sí nos hará recalar en puntos concretos de los 62 órdenes de magnitud que van desde los ladrillos cuánticos del mundo subatómico hasta dominios en los que los planetas no son sino minúsculas gotas de minerales congelados, y aún más allá, hasta la mayor extensión descubierta hasta la fecha, en la que galaxias enteras pululan como centelleantes motas de polvo contra el horizonte cósmico.

Este recorrido por las escalas conocidas de la realidad abarca, en esencia, «todo lo que existe». Tal vez sintamos la tentación de preguntarnos qué viene después. ¿Qué hay más allá de lo que llamamos universo, más allá del todo? ¿Qué podría yacer «fuera» de la habitación soleada y llena de pequeñas motas que constituye nuestra realidad observable? Estas son excelentes preguntas, pero, en sentido estricto, todo lo que se halle «fuera» de nuestro universo habremos de considerarlo, por ahora, «no universo». El umbral que media entre ambos dominios es un lugar que se cierne sobre nuestro horizonte cósmico, cuya escala queda determinada por la distancia recorrida por la luz desde el origen de los tiempos hasta hoy. En el interior se encuentra el universo observable; más allá, un laberinto aún misterioso.

Nuestras vidas transcurren en una delgada franja de la existencia, una situada entre los extremos de lo más diminuto y lo más vasto. Desde ella miramos, escuchamos, olemos y sentimos a través de nuestros organismos pluricelulares compuestos principalmente de agua. De alguna manera, generamos significado a partir de esas sensaciones; experimentamos el resbaladizo fenómeno de la consciencia y gozamos del esquivo don de la inteligencia. Puede que en algún lugar del cosmos haya otras formas de vida complejas que compartan nuestra manera de actuar, sentir y pensar. O tal vez nuestra biología no sea el único camino hacia la vida, y la idea de que la consciencia y la inteligencia emergen del mejunje electroquímico de un cerebro no resulte aplicable a las mentes de otras partes del universo.

Al enfrentarnos a los misterios del yo y a las numerosas escalas del cosmos, lo único que podemos hacer es cruzar los dedos y esperar que nuestra singular experiencia no nos esté llevando por el camino equivocado para desenmarañar las grandes preguntas de la existencia.

En general, nuestra situación resulta un tanto absurda. Nos encontramos en un lugar espantosamente inadecuado para obtener verdades objetivas acerca de la naturaleza de la realidad. A la deriva en un pequeño planeta rocoso, en órbita en torno a una estrella ordinaria del cuatrillón de ellas que pueblan el universo observable, cada uno de nosotros se halla encerrado en un pedacito de carne consciente de sí mismo, incrustado a su vez en una red de evolución biológica que se extiende a lo largo de eones. Y ni siquiera nuestro cuerpo es totalmente nuestro, puesto que sirve de campo de batalla darwinista a billones de bacterias y virus. Y todo eso, toda la vida tal y como la conocemos, parece surgir únicamente de la interacción de una inconcebible cantidad de estructuras moleculares duplicadas: la exquisita sinergia arquitectónica del ADN y el ARN, que al propio tiempo tiene su origen en la física de protones, neutrones, electrones y fuerzas electromagnéticas. Estos diminutos constituyentes no hacen más que seguir las «reglas» fundamentales del universo, las cuales quedaron fijadas hace 13.800 millones de años. Sin embargo, en conjunto, dan lugar a galaxias, planetas, seres humanos, pájaros y quién sabe qué más a lo largo del cosmos.

¿Cómo ocurre todo esto? ¿Cómo comenzó esta historia épica y cómo terminará, si es que alguna vez lo hace? Tales preguntas se sitúan en el centro de nuestros esfuerzos por construir, desde nuestra intempestiva atalaya, una imagen racional de la naturaleza. Toda respuesta es provisional, pero ha de existir en forma de un esbozo vago entre las innumerables intersecciones de las vertiginosas escalas del cosmos. Le invitamos a explorarlas y a deleitarse con su belleza. Después de todo, el universo le pertenece a usted tanto como a cualquiera. IyC


PARA SABER MÁS

**Cosmic view: The universe in forty jumps.** Kees Boeke. John Day Company, 1957.

**Potencias de diez: Sobre el tamaño relativo de los objetos del universo.** Philip Morrison y Phylis Morrison. Biblioteca Scientific American, Prensa Científica S.A., 1984.

**Cosmic eye** (vídeo). Danail Obreschkow, 2012. **www.youtube.com/atch?v=jfSNxVqprvM**

EN NUESTRO ARCHIVO

**Nuestro lugar en el cosmos.** Noam I. Libeskind y R. Brent Tully en *IyC*, septiembre de 2016.

por H. Joachim Schlichting



**H. Joachim Schlichting** es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

# Fracturas en cascada

## Si uno comba un objeto alargado más allá de su límite de ruptura, casi siempre se partirá en más de dos trozos. ¿A qué se debe?

Un gran fresno que hay en mi vecindario me proporciona con regularidad ramas muertas que resultan ideales para encender la chimenea. Son lo suficientemente gruesas, están secas y se quiebran con facilidad. Esto último, en particular, lleva asociado un curioso fenómeno: si agarramos uno de esos palos por ambos extremos y lo doblamos hasta alcanzar el punto de fractura, rara vez se romperá en solo dos trozos, sino que lo hará casi siempre en tres. Este fenómeno, poco comprendido hasta hace poco, no solo ocurre con las ramas de fresno secas, sino con cualquier palo o barra sometido a una deformación intensa.

Una situación cotidiana en la que podemos observar dicho comportamiento es cuando, para cocer pasta, nos disponemos a partir un puñado de espaguetis para ajustarlos al diámetro de la olla. Este ejemplo ha alcanzado cierta notoriedad debido a que el célebre Richard Feynman llevó a cabo el experimento, pero no fue capaz de averiguar por qué, además de espaguetis partidos más o menos por la mitad, aparecían tantos trozos de poco tamaño. Aquel episodio revalorizó este mundano incidente culinario y el fenómeno se convirtió en objeto de investigaciones serias. La solución no llegaría hasta muchos años más tarde, con ayuda de simulaciones y fotografías de alta velocidad.

### Fractura y rebote

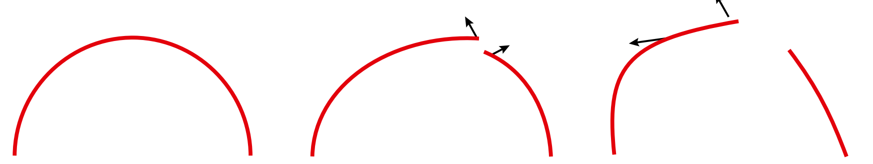
Si observamos de cerca el modo en que se astillan los espaguetis, nos percataremos de que, por lo general, no se quiebran exactamente por su punto medio —donde están más curvados y experimentan la mayor tensión—, sino un poco más allá. Esto puede verificarse a posteriori, poniendo los pedazos uno al lado de otro. La causa de esta asimetría estriba en que los espaguetis no tienen una forma perfectamente cilíndrica ni están hechos de una masa cien por cien homogénea. Por tanto, ceden antes allí donde presentan «defectos de fabricación», donde el efecto conjunto de la tensión aplicada y la fragilidad del material es máximo. Así pues, hasta esta primera ruptura, la explicación resulta intuitiva.

En 2005, Basile Audoly y Sébastien Neukirch, del Laboratorio de Modelización Mecánica del CNRS francés, en París, investigaron el fenómeno con ayuda de una cámara ultrarrápida y dieron respuesta a la pregunta de por qué se encadenan varias fracturas. En primer lugar, las fuerzas de recuperación elástica hacen que las dos partes se apresuren a recobrar su forma inicial estirada. Y, a menudo, en el proceso se produce una nueva ruptura, sobre todo en el trozo de mayor longitud.

Para hacernos una idea de las fuerzas que intervienen, podemos poner un espagueti de punta sobre una mesa y empujarlo suavemente desde arriba hasta doblarlo tanto como sea posible. Si en ese momento lo soltamos, volverá a estirarse y ejercerá una fuerza sobre la superficie de la mesa. Por su parte, la fuerza de reacción de esta catapultará el espagueti hacia arriba.

Ese comportamiento puede ayudarnos a entender lo que sucede cuando doblamos el espagueti con ambas manos hasta superar el límite de fractura, momento en que se parte en dos. Ambos fragmentos se encuentran ahora en una situación similar a la del espagueti que sale disparado hacia arriba desde la mesa. En concreto, si nos fijamos en el trozo de mayor longitud, el extremo que ha quedado libre en el punto de fractura «rebota» de manera fulminante y se mueve en sentido contrario a la flexión original, lo que provoca que se comprima y se curve localmente. Debido a la velocidad con que esto ocurre, el propio espagueti sigue aún combado, por lo que no se halla demasiado lejos del límite de ruptura, el cual vuelve a superarse. Las fotografías de alta velocidad muestran que la segunda fractura se produce apenas 0,1 milisegundos después de la primera. De manera similar, pueden tener lugar una tercera e incluso una cuarta división.

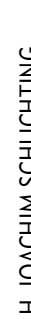
En principio, debería ser posible poner en marcha el mismo proceso doblando el espagueti hasta poco antes del punto de ruptura y volviéndolo a soltar. Como explicábamos arriba, el estiramiento hace que la deformación adicional recorra el espagueti, con lo que ahora sí que podremos sobrepasar la curvatura crítica que antes casi habíamos alcanzado. Por desgracia, el autor de este artículo no ha tenido suerte con el experimento: al parecer, no resulta tan sencillo acercase lo suficiente a la flexión máxima.



CUANDO UN ESPAGUETI CRUDO SE DOBLA (*izquierda*), llega un momento en el que se supera el límite de fractura (*centro*). Después, el fragmento de mayor longitud «rebota» con rapidez en sentido contrario a la flexión original, lo que provoca que se comprima y se curve localmente (*derecha*). Con frecuencia, ello suele provocar una segunda fractura.

*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*, SEGÚN EL AUTOR

AL QUEBRAR un puñado de espaguetis suelen salir volando varios trozos de poco tamaño.




## Ondas transversales

Así pues, al «rebotar» para recuperar su forma inicial, aparece una deformación extra. Este hecho obedece a la aparición de una onda transversal, la cual se superpone a la curvatura ya existente y provoca que, de manera local, se exceda el límite de ruptura. En su trabajo, los investigadores lograron describir este comportamiento de manera cuantitativa. Con ayuda de simulaciones por ordenador, recrearon el fenómeno y obtuvieron una excelente concordancia con las grabaciones de vídeo. Ello confirmó la hipótesis de que eran las vibraciones de flexión inducidas las que provocaban la segunda ruptura.

En mi caso, al quebrar las ramas de fresno para encender la chimenea, pude adquirir una viva impresión de la intensidad de estas ondas. Con los ejemplares muy resistentes, aquellos que solo se dejaban partir con un esfuerzo considerable, experimentaba un intenso dolor en las manos. Este aparecía justo después de que se quebraran: una señal palpable de que la deformación local causada por las ondas de flexión transversales puede ser muy grande.

Esta compleja dinámica no solo reviste importancia para la leña y la pasta, sino que, en sus líneas generales, afecta a cualquier proceso de fractura. Por ejemplo, es posible que muchos maestros y profesores estén familiarizados con otra consecuencia muy similar de las vibraciones mecánicas: el molesto hecho de que una tiza nueva que cae al suelo se rompa en tres o más pedazos que luego resultan inservibles. IyC


PARA SABER MÁS

**Fragmentation of rods by cascading cracks: Why spaghetti does not break in half.** Basile Audoly y Sébastien Neukirch en *Physical Review Letters*, vol. 95, art. 095505, agosto de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

**Por qué se rompen los objetos.** Mark E. Eberhart en *IyC*, diciembre de 1999.

por Bartolo Luque

**Bartolo Luque** es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



# Los números imaginarios son reales

## El tragicómico parto de la solución general de la ecuación de tercer grado y el nacimiento de los números complejos

La manipulación algebraica originaria de la India y desarrollada por los árabes dio carta de ciudadanía numérica al cero y a los números negativos. Estos aparecían de manera natural al resolver ecuaciones como $x + 5 = 5$ o $x + 5 = 2$. Pero, al atacar ecuaciones cuadráticas, los matemáticos de la Antigüedad se toparon con unos nuevos y extraños números. Las soluciones de una ecuación tan sencilla como $x^2 + 5 = 0$ eran $x = \pm\sqrt{-5}$. ¿Qué sentido tenía la raíz de un número negativo?

Todos recordamos desde nuestra adolescencia la fórmula de la solución general de la ecuación de segundo grado $ax^2 + bx + c = 0$. Los matemáticos renacentistas también sabían que sus soluciones venían dadas por

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

En 1496, Scipione del Ferro (1465-1526), que a la sazón trabajaba en la Universidad de Bolonia, fue, hasta donde sabemos, el primero en encontrar una solución para la ecuación de tercer grado. En concreto, resolvió un caso particular que denominaba «incógnitas y cubos igual a números» y que, en versión moderna, sería $x^3 + px = q$, donde $p$ y $q$ denotan números reales. La solución propuesta por Del Ferro fue la siguiente expresión intimidante:

$$x = \sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}.$$

Cómo llegó Del Ferro a este resultado sigue siendo un misterio de la historia de las matemáticas. De hecho, Del Ferro no había comunicado a nadie su secreto. Guardarse para sí los hallazgos matemáticos fue una práctica común hasta el siglo XVIII, y seguro que más de uno se fue a la tumba con su descubridor. Poco antes de pasar a mejor vida, ya en su lecho de muerte, Del Ferro confesó el secreto a su yerno Annibale della Nave. El motivo era asegurarle la sucesión en su cátedra y, con ello, el sustento de su propia hija y nietos. A la revelación asistió también su alumno, el veneciano Antonio Maria del Fiore.

Una de las razones por las que los resultados matemáticos se mantenían en secreto era para asegurarse la victoria en las disputas públicas. En el siglo XVI, cualquier matemático o erudito podía verse desafiado por otro a uno de estos debates. A menudo había una apuesta de por medio, que incluso podía llegar a uno de los escasos puestos universitarios o a un aumento de salario. Pero, sobre todo, se hallaba en juego la reputación de los contendientes. Las disputas intelectuales eran de gran relevancia social; toda la ciudad opinaba e incluso apostaba. Así que, buscando ese crédito, Del Fiore, que atesoraba ahora el secreto de Del Ferro, desafió en 1535 al célebre matemático Niccolò Tartaglia (1499-1557).

Traslademonos, pues, de la sabia Bolonia a la bella Venecia, donde vivía Tartaglia. Su verdadero nombre era Niccolò Fontana: Tartaglia, que significa «tartamudo», era su apodo. Su tartamudez fue resultado de un sablazo que recibió en el cuello a los 12 años a manos de un soldado francés. Fue dado por muerto, pero gracias al tesón de su madre y —cito textualmente a uno de sus biógrafos— «a un perro que le lamió las heridas», logró sobrevivir. Tartaglia procedía de una familia muy pobre. Su padre, cartero, murió joven, lo que dejó a su madre sola con un montón de hijos. Mario Livio, en su excelente libro *La ecuación jamás resuelta* (Ariel, 2007), comenta al respecto que Tartaglia «tuvo que abandonar sus estudios de lectura y escritura del alfabeto al llegar a la letra *k* porque la familia se quedó sin dinero para pagar al tutor».



NICCOLÒ FONTANA TARTAGLIA (1499-1557).



Tartaglia había logrado reputación como matemático tras resolver algunos problemas de artillería para los ingenieros del Arsenal de Venecia. Su fama llegó a oídos de Del Fiore, que, pertrechado con la fórmula mágica de Del Ferro, lo retó en 1535 a una disputa pública.

Cada uno de los contendientes planteó 30 problemas al otro. El perdedor pagaría una cena al ganador y a tantos amigos como problemas hubiera solucionado. Tartaglia llevaba 48 días dándole vueltas a los 30 problemas de Del Ferro sin resolver ninguno: todos pedían soluciones a ecuaciones de tercer grado. El tiempo apremiaba y en 8 días debía consignar las soluciones ante notario. Pero la noche del 12 de febrero de 1535 se hizo la luz y descubrió el secreto de Del Fiore. De un plumazo pudo resolver los 30 problemas.

¿Y Del Fiore? Perdió estrepitosamente. Fue incapaz de resolver ninguno de los 30 problemas de Tartaglia, que finalmente lo eximió del pago de la cena. Tartaglia se convirtió en una celebridad matemática, mientras que Del Fiore se perdió en las tinieblas de la historia. El resultado de la contienda se extendió como la pólvora

por toda Italia y llegó a oídos de nuestro quinto personaje, Gerolamo Cardano (1501-1576), sin lugar a dudas el más singular de todos ellos.

### *Ars magna*

De origen humilde, Cardano era hijo bastardo. Hubo de pagarse sus estudios con el juego, apostando a las cartas, a los dados o al ajedrez. Pero, sin duda, era un genio capaz de hacer de sus vicios virtudes: gracias a su experiencia en el juego escribió el primer libro de teoría de la probabilidad, el *Liber de ludo aleae*, o «Libro de los juegos de azar», publicado póstumamente en 1663. Parece fácil que de esos ambientes sacase los modales rudos y vocingleros con los que ganó muchos debates públicos. No solo fue un gran teórico, sino que se convirtió en uno de los médicos más famosos de Europa y también en un gran inventor: el cardán, esa pieza mecánica que hoy llevan los automóviles y que permite transmitir un movimiento de rotación a dos ejes de direcciones distintas, fue invento suyo, como se desprende de su nombre.

En el momento en que nos encontramos, Cardano estaba redactando su segunda gran obra y encontró imprescindible incluir en ella la fórmula de Tartaglia. Trató de deducirla, pero todo fue en vano, por lo que decidió convencer a Tartaglia de que le revelara su secreto. Tras varias negativas epistolares del tipo «cuando decida hacer pública mi invención será en mi propia obra y no a través de la de otros», Tartaglia cedió finalmente en un encuentro el 25 de marzo de 1539 en Milán. Allí Cardano le hizo la siguiente promesa: «Juro ante vos por los Santos Evangelios y por mi fe de caballero, no solo no publicar jamás vuestros descubrimientos si me los reveláis, sino que también prometo y comprometo mi fe como verdadero cristiano a que los escribiré en clave, para que después de mi muerte nadie pueda comprenderlos. Si yo, en opinión vuestra, soy un hombre honesto, contádmelo, y si no es así demos entonces por terminada esta conversación». La respuesta de Tartaglia fue: «Si no confiara en un juramento como el vuestro, entonces, desde luego, yo mismo merecería ser considerado un ateo». Y le reveló la fórmula.

Pero regresemos a Bolonia, ya que nos falta el último personaje de la tragicomedia: Ludovico Ferrari (1522-1565). En ese tiempo tenía 17 años y era sirviente en la casa de Cardano. Con su amo aprendió matemáticas y acabó convirtiéndose en su



GEROLAMO CARDANO (1501-1576).



amigo. De hecho, Ferrari fue para Cardano el hijo que siempre quiso, a pesar de que hasta donde sabemos tuvo dos: el primero fue ejecutado por haber envenenado a su esposa y el segundo fue un truhan que lo llevó por la calle de la amargura.

En 1542, Cardano y Ferrari consiguieron permiso de Della Nave para rebuscar entre los papeles de su suegro Del Ferro, fallecido 16 años atrás. Sus pesquisas culminaron al encontrar la famosa fórmula, que coincidía con la descubierta por Tartaglia en el desafío. Y, puesto que eso demostraba que Tartaglia no había sido el primero en descubrirla, Cardano se vio libre de publicarla sin faltar a su palabra, atribuyendo su paternidad a Del Ferro. Y así apareció la célebre *Ars magna* en 1545, año considerado como la fecha de nacimiento de los números complejos y el principio del álgebra moderna.

Tartaglia no se lo tomó nada bien, a pesar de que en su obra Cardano agradece dos veces a su «amigo» Tartaglia por haberle comunicado la fórmula. Comienza entonces un intercambio de cartas públicas e incendiarias entre Tartaglia y Ferrari, a las que Cardano permanece ajeno. La polémica entre ellos culmina el 10 de agosto de 1548, con una disputa pública de 31 problemas en Milán, en la iglesia de Santa María del Giardino. El resultado acabó con Tartaglia abandonando la disputa antes incluso de que acabara y sin que Cardano se dignara siquiera a aparecer.

Tartaglia regresó humillado a Venecia, donde falleció en 1557 en la misma pobreza que le había acompañado durante toda su vida. Cardano continuó su hiperactiva carrera, esta vez dedicándose a la astrología hasta el extremo de atreverse a escribir el horóscopo del propio Cristo. La Inquisición lo encarceló, hasta que intercedió el mismísimo papa. Pero lo más fascinante es que predijo el día de su muerte y acertó. Aunque con algo de trampa: se suicidó el día que había predicho.

### Operar con números complejos

Cardano generalizó la solución de Tartaglia para la ecuación de tercer grado y Ferrari encontró una solución para la de cuarto grado. Todos esos descubrimientos fueron publicados por Cardano en su *Ars magna*, donde aparecen los primeros cálculos explícitos de la historia con números complejos.

Un ejemplo, contenido en la obra, es el siguiente: «Divídase 10 en dos partes, de modo que una por la otra den 40». En notación moderna se trata de resolver la ecuación cuadrática

$$x(10 - x) = 40\,.$$

Las dos soluciones que daba Cardano eran

$$x = 5 \pm \sqrt{-15}\,,$$

dos números complejos a los que llamaba «soluciones intrigantes». Cardano, como todos los matemáticos previos a él, no encontraba sentido alguno a las raíces cuadradas de un número negativo. Estas, razonaba, nos piden que encontremos un número que multiplicado por sí mismo arroje un resultado negativo. Pero ni los números positivos ni los negativos cumplen esto, concluía, razón por la que se refería a tales raíces como «cantidades sofísticas».

Este tipo de ecuaciones cuadráticas con soluciones dadas por raíces de números negativos se conocían desde la Antigüedad, pero los matemáticos no habían sentido necesidad de ir más allá y habían zanjado la cuestión sentenciando que tales ecuaciones carecían de solución. Cardano fue algo más audaz al mostrar, en casos sencillos como este, que, al menos formalmente, sus cantidades sofísticas proporcionaban una solución: «Multiplicando $x = 5 + \sqrt{-15}$ por $10 - x = 5 - \sqrt{-15}$ obtenemos $25 - (-15)$. Por tanto, el producto es 40».

Pero la cuestión se tornaba «intrigante» al comprobar que la fórmula de Cardano-Del Fierro para la ecuación general de tercer grado, al aplicarla por ejemplo a $x^3 - 15x = 4$, para la que se sabía que $x = 4$ era solución, devolvía el galimatías

$$x = \sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} + \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}}\,,$$

donde aparecían raíces cuadradas de números negativos insertadas a su vez dentro de raíces cúbicas.

Tuvo que pasar una generación de matemáticos para que la cuestión avanzase. Fue Rafael Bombelli (1526-1572), también estudiante de Cardano, quien tuvo la valiente idea de aceptar que, sencillamente, existía un nuevo tipo de números cuyo cuadrado era negativo. En vez de especular sobre su naturaleza e intentar denotarlos de forma especial, Bombelli se limitó a operar con las raíces de números negativos como lo haría si se tratase de números normales. Así, al elevar al cuadrado la raíz de –1, obtenemos –1. Lo que Bombelli sí supo ver fue que, si se extendía el sistema numérico existente, como se había hecho anteriormente con las fracciones, el cero y los números negativos, podían resolverse problemas que de otra forma carecían de solución.

Si estos nuevos números eran un «descubrimiento» y no una «invención» (la mayoría de los matemáticos son platónicos y hablarían de esta manera), deberían comportarse como el resto de los números conocidos; es decir, siguiendo las reglas establecidas del álgebra y la aritmética. Bombelli mostró que era posible sumar, restar, multiplicar y dividir de forma coherente números complejos como si fueran polinomios en la variable $i = \sqrt{-1}$, con la regla impuesta de que $i^2 = -1$. Ello permitía demostrar, por ejemplo, que la solución al galimatías anterior daba efectivamente 4 cuando se operaba de esta manera.

Por desgracia, el propio Bombelli pensó que todo esto no era más que un mero truco. Los matemáticos seguían empantanados en cuestiones como que elevar al cuadrado un número $x$ equivale a calcular el área de un cuadrado de lado $x$. Un área positiva tiene sentido, pero ¿qué sentido tiene un cuadrado de lado $\sqrt{-1}$ con un área negativa de –1? Deliberaciones como estas impidieron durante otros 200 años el desarrollo de los números complejos. La aparición de un enfoque más profundo y rico solo llegó mucho tiempo después de la muerte de Bombelli.

Para que se hagan una idea del estado de la cuestión, sesenta años después de que Bombelli decidiera tirar por el lado salvaje, René Descartes aún escribía en su obra *La géométrie* (1637): «A pesar de que podemos pensar que la ecuación $x^3 - 6x^2 + 13x - 10 = 0$ tiene tres raíces, únicamente una de ellas es real, la cual es 2; las otras dos... son simplemente imaginarias». Fue esta la primera vez en que se usó el término *imaginario*, de forma despectiva, para referirse a los números complejos.

La misma perplejidad que el filósofo francés debió de sentir el gran Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) frente a tales números. Así describía la sensación místico-zoológica que le producían: «Los números imaginarios son un excelente y maravilloso refugio del Espíritu Santo, una especie de anfibio entre ser y no ser». Otros términos que se emplearon para referirse a los números complejos fueron «números sin sentido» (Neper), «inexplicables» (Girard), «incomprensibles» (Huygens) o «imposibles» (diversos autores). Incluso el propio Leonhard Euler (1707-1783), que los incorporó definitivamente al acervo matemático, decía sobre ellos: «Estos números no son nada, ni menos que nada, lo cual necesariamente los hace imaginarios, o imposibles». Durante 200 años, los matemáticos trabajaron con números complejos en sus cálculos y demostraciones manteniendo, sin embargo, un tremendo escepticismo sobre ellos y sin llegar a ver su profundo significado.

**El plano complejo**

¿Cómo se desatascó el asunto? Observemos qué sucede cuando calculamos potencias de $i$. Si elevamos al cuadrado la unidad imaginaria, tenemos

$$i^2 = -1.$$

Al cubo,

$$i^3 = i^2 i = (-1)i = -i.$$

A la cuarta potencia,

$$i^4 = i^3 i = (-i)i = 1.$$

Y por último, si elevamos a la quinta,

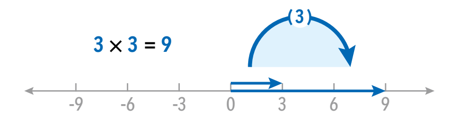
$$i^5 = i^4 i = 1i = i,$$

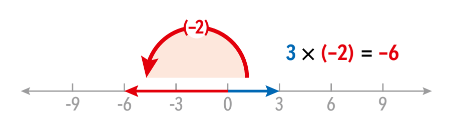
¡volvemos al principio! Un comportamiento bien extraño si lo comparamos con la potenciación de números reales. Y aquí se escondía la pista.

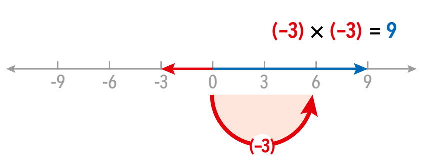
Para arrojar luz sobre lo que está sucediendo, vayamos a la recta real. Sabemos que la recta real está «llena», completa con los números que nos resultan familiares. No caben más, por lo que los imaginarios no pueden habitar ahí. Usemos flechas, en vez de puntos como es habitual, para señalar números en la recta real. El número 3, por ejemplo, quedará representado por una flecha con su origen en el 0 y la punta en el 3 (*véase la figura 1*).

Observemos en la figura cómo al multiplicar dos números positivos, como 3 × 3, obtenemos un número también positivo (9 en este caso), que por tanto mantiene el sentido de la flecha original. Si multiplicamos un número positivo por uno negativo, como 3 × (–2), el resultado es negativo, de modo que cambia el sentido; es decir, rota 180 grados. Y si multiplicamos dos números negativos, como (-3) × (-3), obtenemos un número positivo: de nuevo se produce una rotación de 180 grados con respecto al lugar de partida. En resumen, la multiplicación por números negativos implica una rotación de 180 grados en la recta real. De esta manera, al elevar al cuadrado un número negativo, acabaremos siempre en terreno positivo.

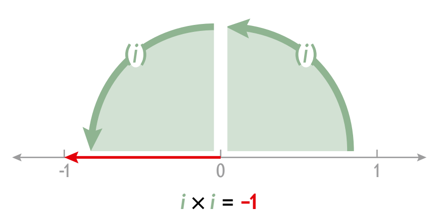
Recordemos ahora que al multiplicar la unidad imaginaria por sí misma obtenemos $i^2 = -1$. Parece claro que para acabar en tierra negativa necesitamos algo intermedio, un número cuyo cuadrado lo



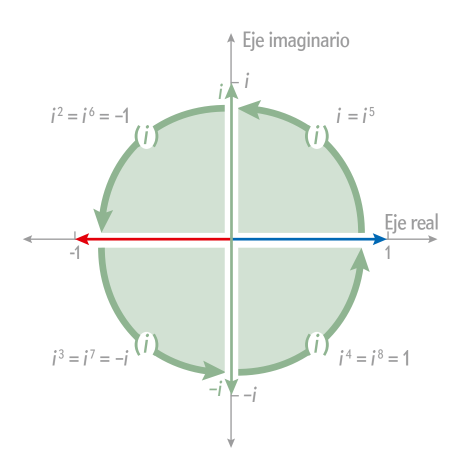

**1. MULTIPLICACIÓN REAL:** En la recta real, la multiplicación por un número negativo (*rojo*) implica un giro de 180 grados, tanto si el número de partida es positivo (*centro*), como si es negativo (*abajo*). Por su parte, la multiplicación por un número positivo (*azul*) puede verse como un giro de 0 grados (*arriba*).




**2. UNIDAD IMAGINARIA:** El número $i$ se define como la raíz cuadrada de –1; es decir, como el número que satisface $i^2 = -1$. Dado que multiplicar por –1 equivale a una rotación de 180 grados, la multiplicación por $i$ (*verde*) puede entenderse como una rotación de 90 grados. Ello obliga a abandonar la recta real.

haga rotar 90 grados, no 180. De modo que $i$ debe estar rotado 90 grados con respecto a los positivos y, al multiplicarlo por sí mismo, se produce otra rotación de 90 grados, con lo que termina en territorio negativo (*véase la figura 2*).

Dado que multiplicar por $i$ corresponde a una rotación de 90 grados, si colocamos un eje «imaginario» en ángulo recto con la recta real, nuestra álgebra encajará a la perfección con nuestra geometría. Observemos la figura 3. Si comenzamos




**3. POTENCIAS IMAGINARIAS:** Las sucesivas multiplicaciones por $i$ (*verde*) equivalen a concatenar rotaciones de 90 grados, por lo que al efectuar cuatro de ellas regresaremos siempre al punto de partida. Esta cualidad cíclica concuerda con las propiedades algebraicas de las potencias de $i$: $i^1 = i$, $i^2 = -1$, $i^3 = -i$, $i^4 = 1$, $i^5 = i$, etcétera.

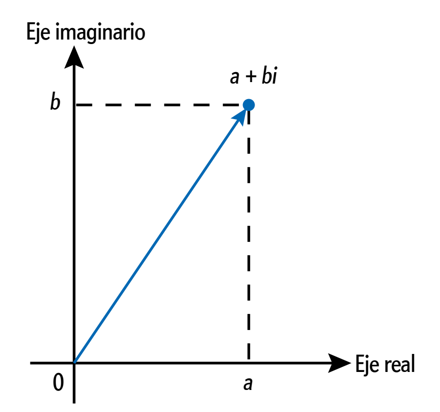
con el número real 1 y lo multiplicamos por $i$, algebraicamente obtenemos $i$, que se corresponde geométricamente con una rotación de 90 grados. Multiplicar de nuevo por $i$ da como resultado −1, que vuelve a estar rotado 90 grados con respecto al anterior. A medida que seguimos elevando $i$ a más y más potencias, continuamos girando alrededor del origen y las posiciones de los números resultantes se repiten cada cuatro pasos, tal y como ocurría algebraicamente. Hemos descubierto que los números imaginarios se esconden en una dimensión perpendicular a la recta real. Los números complejos no son más que una extensión natural de nuestro sistema numérico de una dimensión a otro bidimensional.

Una vieja práctica en matemáticas que se remonta a los antiguos griegos es la prueba geométrica. Presentar una idea matemática visualmente le confiere un estatus de protoverdad. Numerosos matemáticos del siglo XVII intentaron encontrar una descripción geométrico-visual de los números imaginarios y fracasaron, lo que solo aumentó aún más la perplejidad de la comunidad. La idea de que los números imaginarios han de situarse en ángulo recto con respecto a los reales no es obvia ni mucho menos.

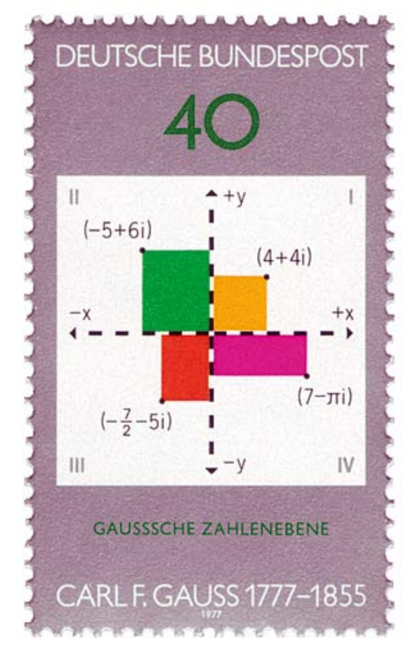
Tras la muerte de Bombelli, una caterva de mentes brillantes fue incapaz de verlo durante 200 años. Fueron dos matemáticos aficionados, Caspar Wessel (1745-1818) y Jean-Robert Argand (1768-1822), quienes, en torno a 1800, dieron primero y de manera independiente con la idea que hemos descrito aquí. Wessel propuso la primera representación geométrica de los complejos en 1797; Argand hizo lo propio hacia la misma época.

Aun así, incluso en 1831, un matemático de la talla de Augustus de Morgan decía: «Vemos que el símbolo $\sqrt{-1}$ está vacío de sentido, o más bien que es autocontradictorio y absurdo». Hubo que esperar a que el príncipe de las matemáticas, Carl Friedrich Gauss (1777-1855), propusiera la interpretación geométrica actual de los números complejos. En 1831, Gauss planteó representar un número complejo $z = a + bi$ (donde $a$ y $b$ denotan números reales) como un par ordenado de números reales $a$ y $b$, escrito como $z = (a, b)$. De modo que, como vemos en la figura 4, el eje de abscisas representa la parte real ($a$), y el de ordenadas, la imaginaria ($b$). Hoy se denomina a esta notación «en componentes» o «en coordenadas cartesianas», ya que los números complejos se entienden como puntos en el plano de dos dimensiones.

Dicho plano se conoce como plano complejo, y constituye una extensión de




**4. PLANO COMPLEJO:** Un número complejo arbitrario puede siempre escribirse como $a + bi$, donde $a$ y $b$ denotan números reales y el símbolo $i$, la raíz cuadrada de −1. Su representación corresponde a un punto del plano con coordenadas cartesianas $(a, b)$.




**SELLO ALEMÁN** conmemorativo de los 200 años del nacimiento de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) con una representación del plano complejo. El príncipe de las matemáticas prefería el término *lateral* a *imaginario* e *inverso* a *negativo* para evitar la contaminación del lenguaje cotidiano. Así, propuso llamar *directos* a los números que se encontraban a la derecha del origen, *inversos* a los que se hallaban a la izquierda, y *laterales* a los que se situaban por encima y por debajo.

la recta real en la que la dimensión imaginaria se sitúa en la vertical. En el plano cartesiano *XY* no hay en principio relación alguna entre los ejes. Sin embargo, en el plano complejo, las reglas del álgebra imponen una relación muy particular y fructífera entre ambas dimensiones. A pesar de su peyorativa denominación original de «imaginarios», finalmente los números complejos se mostraron tan reales como los reales, y acabarían convirtiéndose en una herramienta clave para describir el mundo natural.

### PARA SABER MÁS


**An imaginary tale: The story of $\sqrt{-1}$.** Paul Nahin. Princeton University Press, 1998.

**Cardano y Tartaglia: La aventura de la ecuación cúbica.** Francisco Martín Casalderrey. Nivola, 2010.

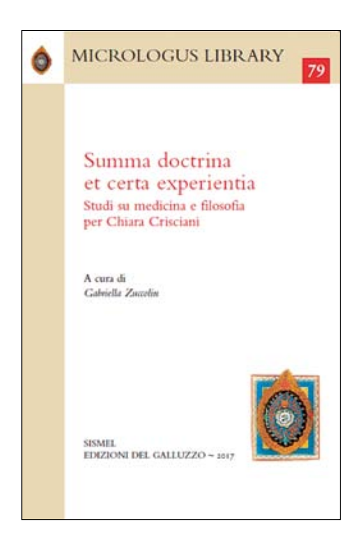
**Imaginary numbers are real.** Stephen Welch. Welch Labs, 2016. Descarga gratuita en **www.welchlabs.com/resources/freebook**


### EN NUESTRO ARCHIVO


**Cómo imaginarse los números imaginarios.** Martin Gardner en *IyC*, octubre de 1979.



*INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, SEGÚN EL AUTOR; DOMINIO PÚBLICO (*sello*)




**SUMMA DOCTRINA ET CERTA EXPERIENTIA**
**STUDI SU MEDICINA E FILOSOFIA PER CHIARA CRISCIANI**

Dirigido por Gabriella Zuccolin
Edizioni del Galluzzo, 2017

# Medicina medieval

*Ciencia, filosofía y transmisión del conocimiento en la Edad Media*

Este libro en homenaje a Chiara Crisciani constituye una buena excusa para una incursión en el conocimiento actual sobre la ciencia medieval. Se pasa revista a la relación entre medicina y filosofía, la conexión entre temas biológicos e instancias éticas y a problemas de teoría del conocimiento y epistemología. Hay algunas notas complementarias que pudieran considerarse marginales, como el ensayo de Michael MacVaugh, máximo experto en nuestro Arnau de Vilanova, y Nancy Siriasi, historiadora de la medicina renacentista, sobre la arribada de la teoría harveyana de la circulación de la sangre al continente norteamericano en un tiempo en el que no se había institucionalizado todavía la medicina.

Es Crisciani, junto con Danielle Jacquard y Michella Pereira, una de las grandes figuras medievalistas, un ámbito en el que abundan las mujeres. A la italiana la caracteriza su empeño colaborador. Por ceñirme a dos ejemplos, con Jole Agrimi ha compartido el interés en la medicina escolástica medieval, indagada en sus nexos con la filosofía, con especial detenimiento en la valoración de la enfermedad (*infirmitas*) y la asistencia (*caritas*). Fruto de esa colaboración fue *Edocere médicos*, donde exponen cómo, a partir del siglo xiii, apareció en las universidades la nueva figura del médico ilustrado, legitimado por un currículum académico. Allí las autoras documentaban la evolución de la disciplina médica y sus modelos de transmisión en el curso de la Baja Edad Media. Ambas publicaron juntas también *Les consilia médicaux*, sobre casos y preceptos terapéuticos en situaciones particulares. Con Michela Pereira abordó la tradición de la alquimia latina medieval en *L'arte del sole e della luna*. Por su parte, Crisciani ha ahondado en la contigüidad y las diferencias entre alquimia y medicina en el Medievo tardío. Singulares han sido su aportación a la llamada medicina de corte, sobre todo del norte de Italia, y la revalorización de los escritos científicos y filosóficos en lengua vulgar.

Epitomiza la fundamentación conceptual de la medicina medieval el aforismo latino *ubi desinit physicus, ibi medicus incipit* («donde termina el filósofo natural, comienza el médico»), que simboliza la relación de dependencia de la medicina con respecto a la filosofía, entendida esta como ciencia que se ocupa de los principios de la naturaleza. La fuente es el *De los sentidos y de lo sentido* aristotélico. La subordinación de las ciencias constituye un tema muy vivo en toda la Edad Media; en este caso, la subordinación de la medicina a la filosofía natural, cuyas teorías más generales constituirían los principios (que no se demuestran), el fundamento teórico de doctrinas más determinadas y elaboradas por médicos. En su expresión originaria, que aparece en un florilegio del siglo xiii compilado por el franciscano Johannes de Fonte, presentaba una ligera modificación literal, pero el significado era el mismo. Alberto Magno realizó, en los años 1256-1257, una paráfrasis del *De los sentidos y de lo sentido* donde expone que los filósofos naturales no deben tratar de la salud y la enfermedad en cuanto tales, sino de sus causas y primeros principios.

Si Aristóteles regía en los principios, en la medicina propiamente dicha se vivía de un galenismo arabizado, aunque sin perder a Hipócrates del horizonte; una figura que al historiador medieval se le ofrece, a la vez, omnipresente y borrosa, cambiante. ¿Qué representa el maestro de Cos para un médico ilustrado que solo conoce una parte ínfima de las obras que portan su nombre? Está, en cambio, familiarizado con Galeno, cuyos tratados, entre los siglos xii y xiv, no han dejado de ser traducidos y en ocasiones retraducidos. Pero, aparte de las tres obras canónicas (*Aforismos*, *Pronósticos* y *Régimen de las enfermedades agudas*), cuya lectura sirvió de apoyo a la enseñanza, antes incluso del período universitario, el manejo de otros títulos hipocráticos era esporádico. Sin embargo, el descubrimiento de un texto como *De natura foetus* no pasó inadvertido y el mensaje hipocrático cristalizó. El conocimiento indirecto, a través de Galeno y, de forma menos percibida por los médicos medievales, a través de los autores árabes, se hallaba más extendido que la confrontación directa con los propios textos. Bien puede afirmarse que la ciencia medieval gira en torno a los *Aforismos* de Hipócrates y los *Elementos* de Euclides [*véanse* «Hipócrates», por José Alsina; Investigación y Ciencia, enero de 1982, *y* «Galeno de Pérgamo (ca. 130-200)», por José María López Piñero; Mente y Cerebro, n.º 22, 2007].

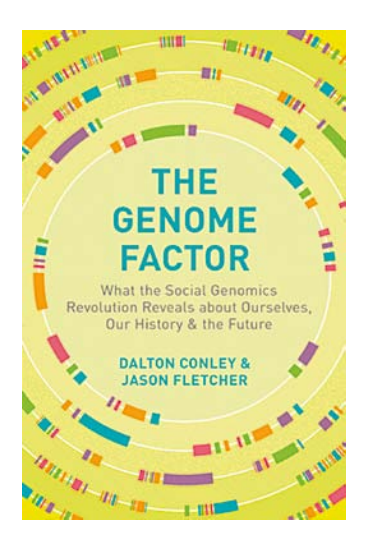
Entre los siglos xiii-xv se difundió un nuevo género de literatura médica, el de los *consilia*. De manera estructurada aparecen ya en los primeros escritos de Taddeo Alderotti (1223-1295). El *consilium* consta de tres partes: el caso, o descripción más o menos detallada de una patología que hay que curar; una dieta o farmacopea, que permite tratar la enfermedad; y el paciente. Pero había otras formas y tipologías que se relacionaban con otros géneros: recetarios, *experimenta*, tratados o los regímenes de salud, que transitaban de un discurso de prohibiciones, basado en reglas prescriptivas, a uno de recomendaciones, que dejaba margen a los gustos y deseos del paciente [*véase* «Materia médica medieval», por José M.ª Valderas en «Ciencia medieval», colección *Temas de IyC* n.º 41, 2005].

Los historiadores suelen individualizar en la obra de Alberto Magno una de las manifestaciones más robustas del pensamiento científico medieval. En él, la biología ocupa un papel central. Fue el autor que más contribuyó en el siglo xiii a la difusión de las tres obras principales de la zoología de Aristóteles: *Historia de los animales*, *Sobre las partes de los animales* y *Sobre la generación de los animales*. En particular, Alberto reflexionó sobre

la generación, que interpreta basándose en la observación, la doctrina aristotélica y la medicina de Avicena. Respecto a la generación, Galeno se apartaba de Aristóteles. Alberto buscó conciliar ambas posturas, en lo posible [*véase* «Alberto Magno, el gran curioso», por Brigit Steib y Roland Popp; Investigación y Ciencia, junio de 2004].

Hay dos puntos fundamentales que deben considerarse en la embriología medieval: el fluido seminal, o principio de la generación, y el proceso de desarrollo, o animación del embrión. Sobre el origen del fluido seminal, Alberto se muestra contrario a la pangénesis (según la cual el fluido vendría generado por todas las partes del cuerpo) y sostiene, en la senda de Aristóteles filtrado a través de Avicena, que tal flujo es el residuo de la cuarta digestión, producida por el calor derivado del corazón. Sabido es que entonces se admitía la existencia de una suerte de fluido seminal femenino. Alberto reduce dicho fluido a la sangre menstrual, negándole la calificación de fluido seminal propiamente dicho, en el sentido riguroso de principio activo y formativo. Ahora bien, aunque Aristóteles sostenga que el fluido liberado por las mujeres durante el coito no sea de origen seminal y no contribuya a la generación, Alberto concede a Galeno que participe en cierta medida en la función coital y el desarrollo embrionario. Alberto rechaza la tesis preformacionista, según la cual el esperma contendría ya un descendiente en miniatura. En lo concerniente a la animación humana, creía que, a diferencia del alma de los animales, de origen natural, se creaba cuando todo el cuerpo estuviera organizado.

*—Luis Alonso*




**THE GENOME FACTOR**
**WHAT THE SOCIAL GENOMICS REVOLUTION REVEALS ABOUT OURSELVES, OUR HISTORY AND THE FUTURE**

Dalton Conley y Jason Fletcher
Princeton University Press, 2017

## Genómica social

*La madurez de una ciencia joven*

¿En qué medida los nuevos avances en genética arrojan luz sobre nuestro conocimiento de las desigualdades sociales? Cuando los científicos implicados en el Proyecto Genoma Humano anunciaron en 2003 que habían terminado la cartografía genética de nuestra especie, muchos pronosticaron que la secuenciación del ADN transformaría la prevención y el tratamiento de las enfermedades. Hoy nos hallamos muy cerca de poder cambiar dicho genoma. La técnica CRISPR (siglas en inglés de «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas») posibilita la edición de nuestros genes y nos introduce en un mundo desconocido.

Desde los días venturosos de la era victoriana de Francis Galton, primo de Darwin y experto estadístico que acuñó el término eugenesia, la heredabilidad de los rasgos sociales ha constituido un tema tabú para la sociología, pues se temía que desde ahí hubiese un paso muy corto hacia la aceptación gubernamental de la eugenesia. Hasta entonces, el estudio de la herencia venía sirviendo para que agricultores y ganaderos mejoraran sus cosechas o reforzaran la cabaña. La herencia nos guía sobre la rapidez con que cambia en una población un rasgo determinado, como la producción de leche o de huevos, a través de una reproducción selectiva. ¿Para qué estudiar, pues, la herencia, si no es por razones eugenésicas?

Resulta ineludible poner *The genome factor* ante el espejo de *The Bell curve*, el libro que Richard Herrnstein y Charles Murray publicaron en 1994 y en el que analizaban la incidencia de la inteligencia en la vida estadounidense y su relación con la raza. Herrnstein y Murray concebían la inteligencia como una entidad unitaria (el «factor G»), hereditaria entre un 40 y un 80 por ciento y mensurable a través de pruebas estandarizadas [*véase* «Medición de la inteligencia», por Robert J. Sternberg en «Inteligencia viva», colección *Temas de IyC*, n.º 17, 1999]. Establecieron una alta correlación entre el cociente intelectual (CI) y el nivel socioeconómico. Los sujetos con un elevado CI tendían a conseguir grados académicos superiores, mejores empleos y tenían menor riesgo de caer en conductas delictivas. Por la misma razón, las personas más inteligentes ascendían con mayor facilidad en la escala social, con independencia de su nivel socioeconómico. De ese modo, gracias a la democratización de la educación, la sociedad se estratificaría de acuerdo con la capacidad cognitiva de los sujetos, a diferencia de lo que pasaba décadas antes, en las que se accedía a una clase social más alta gracias a los apellidos, la religión o la casta, pero con independencia de la habilidad cognitiva.

Por su parte, los autores de este libro, investigadores expertos en las implicaciones sociales de la genómica, ponen sordina a la influencia de la genética en la educación superior; de hecho, la mayoría de las democracias occidentales son mosaicos de gentes de diverso origen, algunas con pasado de esclavitud. La igualdad social y legal es también igualdad biológica. Apelar a diferencias genéticas es abrir las compuertas a la discriminación, lo que explica que los sociólogos hayan venido evitando la genética como a la peste. Pero las guerras naturaleza-cultura han caído en desuso. En los últimos años, economistas y sociólogos han domeñado la revolución genómica para dibujar un cuadro más completo de la vida social humana [*véase* «¿Se halla la cultura en los genes?», por Régis Meyran; Investigación y Ciencia, octubre de 2013].

Los progresos recientes realizados en secuenciación genética en grandes poblaciones plantean numerosas cuestiones. En efecto, casi todos los rasgos psicológicos y conductuales de interés para los científicos sociales son heredables en un

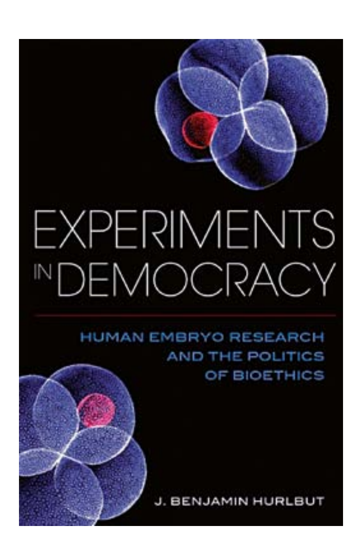
50-60 por ciento, lo que significa que la mitad de la variación que encontramos en una población se hereda, en tanto que el resto se debe a diferencias ambientales. La genómica añade personalización. Tras cartografiar con precisión la incidencia del genoma en el cociente intelectual, la personalidad, el carácter y otros rasgos menores, como la orientación política, diríase que en el genoma se halla el destino de una vida. Y en muchos casos así parece ocurrir; las semejanzas entre gemelos que se han criado en medios completamente distintos abonan esa idea.

El gen, unidad de la herencia, ha dejado de ser una noción vaga en la comunidad científica para convertirse en término de consumo corriente (por una cantidad módica incluso se nos ofrece la secuenciación de nuestra singularidad genética para que podamos saber las enfermedades que nos amenazan). Además de la nutrida cohorte de médicos y biólogos que trabajan en esa línea, se ha ido forjando un grupo de sociólogos, economistas y juristas que han unido sus conocimientos a los de genéticos estadísticos para crear una doctrina sólida sobre la función de los genes en la dinámica social y en las desigualdades entre los ciudadanos.

Ese componente de la revolución genómica rompe con una larga tradición de distanciamiento entre genéticos y sociólogos. A raíz de la publicación en 1871 de *The descent of man*, centrado en la evolución de la especie humana, se produjeron extrapolaciones que resultaron perjudiciales para la sociedad. Pensemos en Herbert Spencer, quien aplicó la selección natural como metáfora de la sociedad humana. El darwinismo social resultante justificaba la pasividad ante las desigualdades y las patologías sociales. Galton se erigió en adelantado de la eugenesia y el propio Darwin se vio involucrado en un debate sobre si blancos y negros pertenecían a especies distintas.

Parte de la razón del recelo de los sociólogos cuando se trata del examen de la genética y su relación con la conducta humana se basa en que las respuestas obtenidas de la genética son deterministas, lo que pugna con los postulados de la sociología. Además, en la medida en que los genes expliquen un fenómeno social, tal hecho naturaliza las desigualdades en ese punto.

—*Luis Alonso*




**EXPERIMENTS IN DEMOCRACY**
**HUMAN EMBRYO RESEARCH AND POLITICS OF BIOETHICS**

J. Benjamin Hurlbut
Columbia University Press, 2017

## Experimentar con embriones humanos

*Cronología y estado actual de una disyuntiva bioética*

El 25 de julio de 1978, el nacimiento de una niña ocupó la portada de los principales periódicos del todo el mundo. Nacida en un hospital provincial, hija de un matrimonio inglés de ingresos modestos, había sido concebida de manera singular. Aquel producto de laboratorio constituía la prueba de que se había iniciado una revolución en la reproducción humana. Louise Brown era el primer bebé de la historia de la humanidad concebido fuera del seno materno, después de algunos intentos menos exitosos en años anteriores. De ese modo, el embrión in vitro pasó a ser objeto de debate público, ambición científica y consideración ética [*véase* «La fertilización humana externa», por Clifford Grobstein; Investigación y Ciencia, agosto de 1979].

Desde aquel episodio hasta la derivación de células madre embrionarias humanas, pasando por la clonación, la investigación sobre el embrión ha traído una profunda transformación de las ciencias de la vida, la legislación y la opinión pública en muchos países. El libro de J. Benjamin Hurlbut se centra en los Estados Unidos y sigue un orden cronológico para detenerse en los momentos clave y resumir las controversias surgidas.

Desde mediados de los años sesenta hasta los ochenta, se produjeron avances técnicos en lo que se refiere a la fecundación in vitro en humanos y al cultivo de embriones. Tales progresos indujeron la creación de los primeros comités estadounidenses de bioética; en particular, el Consejo de Asesoramiento Ético, constituido en 1978 para revisar caso por caso las propuestas de investigación y su valoración atendiendo a la pluralidad de opiniones en torno a su moralidad. Un tema central fue la consideración del estatuto moral del embrión, de enorme repercusión en aspectos jurídicos del individuo y de la sociedad. Se estableció entonces la norma de los 14 días como fecha límite para el mantenimiento in vitro del embrión. El Consejo de Asesoramiento Ético fue disuelto en 1980, coincidiendo con la reclamación de una moratoria sobre la investigación en ese ámbito, la cual duró hasta 1993.

En los años ochenta se pasó del laboratorio a la praxis clínica. A finales del decenio, había en Estados Unidos cientos de clínicas de fecundación in vitro con miles de pacientes anuales. En respuesta a esa industria lucrativa y sin regular, la Sociedad Americana de Fertilidad estableció un comité de ética en 1985. Adoptó un enfoque tecnocrático de la deliberación sobre el estatuto moral del embrión, introduciendo un nuevo término, *preembrión*, en un intento de disciplinar el debate político. Pero se produjo el efecto contrario: lo enconó, al no aportar base científica suficiente para tal acotación, habida cuenta de la continuidad del desarrollo embrionario.

El Congreso de los Estados Unidos puso fin a la moratoria en 1994. Se instituyó el Grupo de Expertos sobre Investigación con Embriones Humanos, un organismo cuya creación parecía obligada para respaldar la financiación pública de

la investigación in vitro. Desde mediados de los noventa hasta finales del mandato de Bill Clinton, en 2001, se registraron dos episodios determinantes: la clonación de mamíferos y el cultivo de células madre embrionarias humanas. Con ellos apareció una nueva institución, la Comisión Nacional de Asesoramiento en Bioética (NBAC, por sus siglas en inglés), creada por Clinton en 1996 para secularizar una moral religiosa en términos aceptables por una sociedad plural. La NBAC se erigió en órgano autorizado de la razón pública, al margen del fragor de la política.

Alcanzada la presidencia en 2001, George W. Bush instituyó a finales de ese año el Consejo Presidencial de Bioética, que se propuso encontrar un lenguaje común en el debate. Las expresiones impropias, como «clonación humana», se sustituyeron por otras menos confusas y más ajustadas a la realidad, como «transferencia nuclear para producir células madre pluripotentes». Junto a estas iniciativas federales surgieron otras en diferentes estados, la más famosa de las cuales fue una propuesta en California para financiar con 3000 millones de dólares la investigación sobre células madre embrionarias humanas. De manera paulatina, se fue intensificando la atención sobre la necesidad de implicar al poder político en aspectos de la ciencia que repercutieran en el bienestar de los ciudadanos.

**La investigación sobre el embrión ha traído una profunda transformación de las ciencias de la vida, la legislación y la opinión pública en muchos países**

Hoy el problema es la edición génica del embrión. En abril de 2015 se informó de un trabajo, realizado en la Universidad Sun Yat-sen de Guangzhou, sobre modificación genética de embriones humanos. Los investigadores aplicaron el sistema CRISPR-Cas9 para modificar el ADN con la introducción de nuevas secuencias. En un intento deliberado por obviar objeciones éticas, los autores emplearon embriones no viables procedentes de una clínica de reproducción asistida: los óvulos habían sido fecundados por dos espermatozoides, de suerte que el desarrollo embrionario no llegara a término. El artículo promovió un movimiento de reacción en la comunidad científica que solicitaba una moratoria en esa nueva línea de trabajo de consecuencias imprevisibles [*véase* «La cumbre sobre edición génica en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon; Investigación y Ciencia, febrero de 2016].

Pese a tales preocupaciones, asistimos a una auténtica fiebre por aplicar la técnica CRISPR-Cas al genoma de niños futuros. De hecho, contamos con un amplio repertorio de posibilidades ofrecidas por la edición génica para el estudio del desarrollo en los embriones. Recientemente, la Autoridad Británica de Fecundación y Embriología Humanas ha aprobado ya esa línea de investigación, propiciada además por el advenimiento de nuevas técnicas para el cultivo in vitro hasta el umbral de la gastrulación.

*—Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

**FEBRERO**

# 1968 Economía nuclear

«La energía nuclear, como el niño de los vecinos, parece haber crecido de la noche a la mañana. Que ha llegado a la mayoría de edad es incontrovertible. Durante sus dos años de servicio ha respondido de casi la mitad de la nueva capacidad de generación de energía demandada por las compañías de electricidad estadounidenses. Resulta también indiscutible que alcanzó rápido la madurez. La primera central de gran tamaño (una instalación de 428.000 kilovatios en San Onofre, California) no recibió el permiso de construcción hasta febrero de 1964, y los anuncios de proyectos de energía nuclear comercial no empezaron a cobrar impulso hasta el otoño de 1965; pero ya en el verano de 1966 se había puesto a la altura de la energía fósil en el mercado eléctrico. No es arriesgado afirmar que nadie, ni el más optimista de los fabricantes de reactores, esperaba una tan rápida y resuelta penetración en el mercado».

# 1918 Exportación de automóviles

«EE.UU. es hoy el mercado mundial de coches y camiones motorizados. Un agente de la Oficina de Comercio Exterior e Interior informa que en Japón predomina una próspera situación para el negocio, pues allá las ventas son más altas que nunca, especialmente las de coches grandes. En ese país existen hoy unos 2400 automóviles, 600 de los cuales se importaron durante los primeros nueve meses del año pasado, frente a 216 durante todo 1916. En Japón las carreteras son estrechas y los puentes poco resistentes, pero el Gobierno está invirtiendo dos millones de dólares en la carretera de Tokio a Yokohama, y ha ordenado a las provincias que mejoren sus carreteras y puentes.»

## Tacones altos

«Por desgracia, la moda que promueve unos tacones cada vez más altos es tan poco higiénica como antiestética. Con una cámara cinematográfica, el doctor Édouard Quénu ha logrado analizar el poco natural modo de andar que producen unos tacones de siete centímetros o más de alto. En la película vemos pasar a la colaboradora del experimento dando unos pasos cortos, bruscos, moviendo los pies por el aire y posándolos y separándolos del suelo con gran rigidez, sin cambiar la posición relativa de tacón y puntera, lo que tiene por efecto un atiesado y torpe deslizarse, más que un caminar. Se trata del espasmódico movimiento de un muñeco automático, no el andar flexible digno de un ser humano vigoroso.»




1968




1918



1868

## Globos para la guerra

«La Armada francesa está empleando globos cometa con el propósito de localizar a los submarinos alemanes que acechan frente a la costa o en los accesos a puertos importantes. La vida en el mar de un observador en globo está llena de emociones fuertes, especialmente en los momentos en que trepa hacia un globo que se balancea encima del buque de arrastre [*véase la ilustración*]. De tales observadores se dice que algunas de sus actuaciones en ese punto podrían equipararse perfectamente a las de un funámbulo diestro.»



EN 1918, los observadores franceses que buscaban submarinos enemigos debían ser ágiles como equilibristas para poder trepar hasta la cesta de los globos cometa.

# 1868 Una discusión explosiva

«Se ha realizado una investigación sobre la última catástrofe con nitroglicerina, una explosión en Newcastle, en Inglaterra. El inventor del "aceite para voladuras", el señor Alfred Nobel, de Hamburgo, al escribir al *Times* de Londres acerca de ese accidente, se queja amargamente de que la introducción del valioso explosivo haya sido rechazado sistemáticamente a causa de los percances provocados por groseros descuidos. Parece que la explosión de Newcastle se debió a la flagrante violación de las instrucciones impresas. Las latas que contenían la nitroglicerina fueron abiertas a palazos y luego arrojadas a un agujero una sobre otra. La explosión tuvo lugar por culpa de la consiguiente sacudida.»

## Un hogar estricto

«La *New England Farmer*, publicada en Boston, ofrece cada semana unas sugerencias muy sensatas para la vida y el buen gobierno familiar: "¡No teman, buenas gentes, a divertirse un poco en casa! No cierren sus hogares por miedo a que el sol les destiña las alfombras y los corazones; por miedo a que una risa cordial haga caer esas rancias telarañas. Cuando al hogar se lo considera solo un lugar donde comer, beber y dormir, se allana el camino que desemboca en las casas de juego y en una perdición irreversible. Los jóvenes deben tener un sitio donde divertirse y relajarse; si no lo hallan en sus propias casas, lo buscarán por otros lugares menos provechosos."»

*SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. CXVIII, N.º 6, 9 DE FEBRERO DE 1918



ASTROFÍSICA

## Una nueva imagen del universo violento

*Alberto Domínguez*

El telescopio espacial Fermi, de la NASA, ha completado el primer mapa celeste de fuentes ultraenergéticas. El logro revela algunos de los procesos astrofísicos más extremos del universo conocido.



AGRICULTURA

## La revolución agrícola del fitobioma

*Marla Broadfoot*

La manipulación de la compleja conversación que las plantas mantienen con los microorganismos, las plagas, los nutrientes y otros elementos de su hábitat promete mejorar las cosechas.



MEDICINA

## El problema de los anticuerpos dirigidos contra fármacos

*Michael Waldholz*

Muchos de los medicamentos más modernos desencadenan un ataque inmunitario por parte de nuestro propio organismo, que los incapacita.



INFORME ESPECIAL

**EL FUTURO DEL DINERO**

## Cómo detener la concentración de la riqueza

*Alexander Lipton y Alex «Sandy» Pentland*

## El mundo después del bitcóin

*John Pavlus*

## El impacto social de la tecnología de cadena de bloques

*Natalie Smolenski*

**INVESTIGACIÓN Y CIENCIA**

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

**EDITA**

**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



**DISTRIBUCIÓN**

**para España:**
**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

**para los restantes países:**
**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

**PUBLICIDAD**

**Prensa Científica, S. A.**
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

**SUSCRIPCIONES**

**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

**Precios de suscripción:**

| | España | Extranjero |
|---|---|---|
| Un año | 75,00 € | 110,00 € |
| Dos años | 140,00 € | 210,00 € |

**Ejemplares sueltos: 6,90 euros**

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

**COLABORADORES DE ESTE NÚMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

Andrés Martínez: *Apuntes, ¿Por qué la biodiversidad es máxima cerca del ecuador?, Marihuana y cerebro adolescente y ¿Salvará la ingeniería genética a las Galápagos*; Javier Grande: *Apuntes, Rompecabezas hiperfino, Las escalas del universo y Fracturas en cascada*; José Óscar Hernández Sendín: *Las diez técnicas emergentes más prometedoras del momento*; Fabio Teixidó: *El enigma de las nubes*; Carlos Lorenzo: *La evolución de la pelvis humana*; Xavier Roqué: *La aritmética moderna en la España renacentista*; José Ramón Bertomeu: *La tardía prohibición de la cerusa*; M.ª Teresa Piñel: *Nalanda, la universidad más antigua del mundo*; J. Vilardell: *Hace...*



ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España